

Modell eines  
Saturationskernmagnetometers  
basierend auf  
hochgenauen Kalibriermessungen

Von der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Technischen Universität Carolo–Wilhelmina  
zu Braunschweig  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften  
( Dr. rer. nat.)  
genehmigte  
D i s s e r t a t i o n

von Holger Kügler  
aus Bad Bevensen

1. Referent: Prof. a.D. Dr. Peter Weidelt  
2. Referent: Prof. Dr. Karl-Heinz Glaßmeier  
eingereicht am: 11.12.2003  
mündliche Prüfung (Disputation) am: 19.02.2004  
2004  
(Druckjahr)

## **Vorveröffentlichungen der Dissertation**

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät, vertreten durch die Mentorin oder den Mentor/die Betreuerin oder den Betreuer der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

### **Tagungsbeiträge**

**Lauxen R., Kügler H.;** On Ground Calibration of Magnetometers at the IABG (MFSA) Facility; Vortrag auf der 59. DGG-Tagung, Braunschweig (1999)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Durchführung von Kalibriermessungen</b>	<b>4</b>
2.1	Idee und Prinzip einer Kalibriermessung . . . . .	5
2.2	Eine einfache Kalibrierung (Fallbeispiel) . . . . .	7
2.3	Verwendete Koordinatensysteme . . . . .	12
2.4	Laborsystem zur Untersuchung von Magnetometern . . . . .	12
2.4.1	Anforderungen . . . . .	12
2.4.2	Das Laborsystem „Magnetsrode“ . . . . .	14
2.4.3	Leistungsverstärker . . . . .	16
2.4.4	Übertragungsfunktion und Homogenität der Braunbekspulen . .	17
2.4.5	Zusammenfassung möglicher Störgrößen . . . . .	26
2.4.6	Modell zur Korrektur bekannter Störgrößen . . . . .	26
2.5	Automatisierte Messwerterfassung . . . . .	31
2.5.1	Schritt 1: Markierung geeigneter Bereiche in der CCD-Datei . .	35
2.5.2	Schritt 2: Zuordnung der ausgewählten Bereiche zu Kalibrier- schritten . . . . .	38
2.5.3	Schritt 3: Normierung der Vektoren . . . . .	39
2.5.4	Schritt 4: Statistische Auswertung . . . . .	40
2.5.5	Schritt 5: Datensatz schreiben . . . . .	40
2.5.6	Schritt 6: Auswahl der Kalibriervektoren . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Verfahren und Auswertetechniken</b>	<b>42</b>
3.1	Das lineare Kalibriermodell (K-Modell) . . . . .	42
3.2	Bestimmung der linearen Modellkoeffizienten . . . . .	49
3.2.1	Formale Berechnung . . . . .	49
3.2.2	Bestimmung der Güte der Anpassung . . . . .	50
3.3	Auswahl geeigneter Testvektoren . . . . .	51
3.3.1	Achsenmessung . . . . .	51
3.3.2	Spike-Sphere-Messung . . . . .	52
3.3.3	„Ali“-Messung . . . . .	52
3.4	Offset des Magnetometers und Restfeld des Laborsystems . . . . .	53
3.4.1	Verfahren zur Bestimmung von Offset und Restfeld . . . . .	54
3.4.2	Eliminierung des Einflusses von Offset und Restfeld während einer Kalibriermessung . . . . .	54
3.5	Weitere Parameter des Instruments . . . . .	54

3.5.1	Der Einfluss der Temperatur . . . . .	55
3.5.2	AC-Parameter . . . . .	55
3.6	Gleichzeitige Überwachung einer Kalibrierung durch ein zusätzliches Magnetometer . . . . .	59
3.7	Standardisiertes Verfahren zur Kalibriermessung . . . . .	60
3.7.1	Technische Daten . . . . .	63
3.7.2	Visuelle Sichtung der Daten . . . . .	64
3.7.3	Auswertung „Ali“-Messung . . . . .	65
3.7.4	Spike-Sphere-Messungen . . . . .	69
3.7.5	Offsetbestimmung . . . . .	74
3.7.6	Untersuchung zum Verhalten des Sensors bei unterschiedlichen Temperaturen . . . . .	74
3.7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	81
<b>4</b>	<b>Nichtlineare Effekte</b>	<b>82</b>
4.1	Verfahren zur Bestimmung nichtlinearer Modellkoeffizienten . . . . .	82
4.2	Modelle zur Beschreibung nichtlinearer Effekte eines Magnetometers . . . . .	84
4.2.1	Annahme einer nichtlinearen Empfindlichkeit . . . . .	84
4.2.2	Annahme einer nichtidealen Richtungsabhängigkeit der Empfindlichkeit . . . . .	86
4.2.3	Modell ohne Vorkenntnisse über das Verhalten der Übertragungsfunktion . . . . .	86
4.2.4	Ansätze zur Lösung der Koeffizienten mit linearen und nichtlinearen Verfahren . . . . .	86
4.3	Die Querfeldbeeinflussung . . . . .	88
4.4	Untersuchte Magnetometer . . . . .	89
4.4.1	TEMAG-Experiment . . . . .	89
4.4.2	CLUSTER1-Experimente . . . . .	90
4.4.3	CASSINI-Experiment . . . . .	91
4.4.4	EquatorS-Experiment . . . . .	91
4.4.5	„Zopf-Mag“ . . . . .	91
4.4.6	DS1-Experiment und ROMA-Experiment . . . . .	92
4.4.7	Einachsmagnetometer Nummer 1 („Sis“) . . . . .	92
4.4.8	Einachsmagnetometer Nummer 2 („Sisr“) . . . . .	92
4.4.9	Einachsmagnetometer Nummer 3 („Sisb“) . . . . .	93
4.4.10	Einachsmagnetometer Nummer 4 („Sisc“) . . . . .	93
4.5	Vergleich des ermittelten Parametern verschiedener Instrumente . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Modell eines Magnetometersensors</b>	<b>96</b>
5.1	Funktionsmodell des Magnetometers (F-Modell) . . . . .	96
5.1.1	Systematischer Aufbau . . . . .	96
5.1.2	Physikalisches Funktionsprinzip . . . . .	97
5.2	Numerische Simulation des F-Modells . . . . .	100
5.2.1	Block I-1: Erzeugung des Erregersignals . . . . .	100
5.2.2	Block I-2: Beschreibung der Transformation des Magnetfeld in die magnetische Induktion im Kernmaterial . . . . .	101

5.2.3	Block I-3: Das magnetische Verhalten des Kerns in der Simulation	101
5.2.4	Block II: Wechselwirkung des Kerns mit der Induktionsspule . .	104
5.2.5	Block III: Kompensationsspule . . . . .	104
5.2.6	Block IV: Regelkreis; Synthese der Blöcke I–III . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Vergleichende Untersuchung an Magnetfeldsensoren</b>	<b>109</b>
6.1	Exemplarische Auswertung einer Linearitätsmessung . . . . .	111
6.2	Beispiel der Bestimmung eines Minimal-Modells . . . . .	116
6.3	Spike-Sphere-Messungen . . . . .	118
6.4	Der Einfluss der Lage des Ringkerns . . . . .	122
6.5	Messungen an verschiedenen Einachsmagnetometern . . . . .	127
6.6	Der Einfluss von Gradienten über der Messzelle . . . . .	129
6.7	Simulation einer Messung im F-Modell . . . . .	133
6.7.1	Idealer Sensor . . . . .	134
6.7.2	Offset und nichtlineare Übertragungsfunktion . . . . .	134
6.7.3	Ringkern mit Inhomogenitätsstelle gedreht . . . . .	135
6.8	Vergleich von Simulation und Messung . . . . .	135
6.9	Funktionsmodell Dreiachssensor . . . . .	139
6.10	Vergleich v. Simulation e. Dreiachssensors i. F-Modell m. e. entspr. Messung . . . . .	140
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>144</b>
<b>A</b>	<b>Das Laborsystem „Magnetsrode“</b>	<b>147</b>
<b>B</b>	<b>Geometrische Abmessungen des Spulensystems in „Magnetsrode“</b>	<b>152</b>
<b>C</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>155</b>





# 1 Einleitung

Saturationskern–Magnetometer<sup>1</sup> (engl. Fluxgate–Magnetometer) werden seit Jahrzehnten erfolgreich auf Satelliten zur Messung von Magnetfeldern eingesetzt. Die Umweltbedingungen an ihrem Einsatzort erfordern eine technische Optimierung der Magnetometer in Bezug auf ihr Gewicht, ihre elektrische Leistungsaufnahme, ihre mechanische Stabilität, ihres thermodynamischen Verhaltens und der Möglichkeit das Instrument ferngesteuert kommandieren und die gemessenen Daten aufzeichnen zu können. Jedes dieser Magnetometer wird deshalb vor seinen Einsatz im Weltraum zur Sicherstellung seiner Funktionsfähigkeit „am Boden“ qualifiziert.

Dabei führte der Fortschritt in Wissenschaft und Technik in der Vergangenheit zu immer höheren Anforderungen an die Magnetometer in Bezug auf Auflösung, Stabilität, Rauschverhalten, Abtastrate, usw. So löst zum Beispiel das Magnetometer auf dem in einem niedrigen, polaren Orbit fliegenden Magnetfeldsatelliten OERSTED ein Magnetfeld von weniger als 1 nT vor einem Hintergrundfeld von bis zu ca. 65000 nT auf. Andere Magnetometer, die zum Beispiel auf der CLUSTER2 Mission im interplanetaren Raum eingesetzt werden, lösen ein Magnetfeld von wenigen pT vor einem Hintergrundfeld von wenigen nT auf.

Gerade bei Magnetometern, die vor vergleichsweise großen Hintergrundmagnetfeldern, wie dem Magnetfeld der Erde, eine hohe Auflösung haben, treten unter Umständen Effekte auf, die mit der Theorie der Funktionsweise von Fluxgate–Magnetometern, wie sie zum Beispiel bei [Kertz 1969] dargestellt wird, zunächst nicht beschreibbar sind. So wurden am Magnetometer des MAGSAT Satelliten während des Fluges Effekte beobachtet, die auf eine nichtlineare und von der Richtung des Hintergrundfeldes am Ort der Messung abhängige Übertragungsfunktion schließen lassen [Acuña 1981]. Dieser Effekt, im Folgenden Querfeldbeeinflussung genannt, wurde erneut an dem Flugmodell des Magnetometerexperimentes des TETHER–Satelliten auf Basis der Kalibriermessungen untersucht [Kügler 1992]. Dabei konnte eine Querfeldbeeinflussung des Magnetometers nachgewiesen werden. Da alle Aussagen und Annahmen auf dem Verhalten dieses einzelnen Magnetometerexperimentes mit einer Elektronik und zwei Sensoren beruhen, waren sie nicht allgemein auf den Typ des Fluxgate–Magnetometers zu verallgemeinern. Bei der Auswertung der Messwerte hatte sich zudem gezeigt, dass die

---

<sup>1</sup>Das Messprinzip eines Saturationskern–Magnetometers beruht auf dem nichtlinearen Verlauf der Magnetisierungskurve eines ferromagnetischen Kerns. Das Magnetfeld wird dabei nur indirekt gemessen. So kommt es, dass das Magnetfeld  $H$  häufig durch die magnetische Induktion  $B$  dargestellt wird. Tatsächlich gilt aber  $B = \mu_0 \mu_{rel} H$ . Dabei handelt es sich bei  $\mu_0$  um eine Konstante,  $\mu_{rel}$  ist eine materialabhängige Größe, die im Vakuum 1.0 und in der Luft  $\approx 1.0$  ist. Für diese Fälle unterscheiden sich  $H$  und  $B$  nur durch einen konstanten Vorfaktor. Magnetfelder werden deshalb in dieser Arbeit unter Umständen nicht in A/m sondern in T, nT und pT angegeben.

verwendete Messkette, die Messwertaufnahme und somit auch die anwendbaren Auswerteverfahren nicht optimal waren.

Im Rahmen der CLUSTER1 Mission bot sich die Gelegenheit, weitere Fluxgate-Magnetometer mittels Kalibriermessungen zu untersuchen und die Mess- und Analyseverfahren der Kalibriermessungen zu verbessern. Insgesamt wurden im Rahmen dieses Projektes sechs Magnetometer mit 12 Sensoren untersucht [Rahm/Richter 1992-1996, Kügler 1992-1996]. Die hier entwickelten Verfahren wurden in den folgenden Jahren auf weitere Instrumente angewandt<sup>2</sup>. Nach Auswertung der Messungen an den verschiedenen Instrumenten zeigt sich, dass nicht für alle Instrumente eine Querfeldeinflussung bestätigt werden kann. Aus diesem Grund erfolgen weitere Untersuchungen, die letztlich zu einem Modell eines Saturationskernmagnetometers, basierend auf hochgenauen Kalibriermessungen, führen. Dieses Modell ist in der Lage, die an den Magnetometern beobachteten nichtlinearen Effekte in erster Näherung zu beschreiben.

Da es insgesamt etwas aufwendig wäre, den Gang der Entwicklung dieses Modells in allen Einzelheiten zu verfolgen, wird in dieser Arbeit nur der Endpunkt der Entwicklung dargestellt. Bevor allerdings das Modell (in der Arbeit F-Modell genannt) selbst vorgestellt wird, werden zunächst die Grundlagen bereitgestellt, die eine hochgenaue Messung von Magnetfeldern unter den Bedingungen des Erdmagnetfeldes erlauben. Daher wird im Kapitel 2 das angewandte Untersuchungsverfahren durch Kalibriermessungen vorgestellt und anhand eines einfachen Beispiels auf einen Dreiachssensor angewendet. Die weiteren Abschnitte dieses Kapitels führen das bei den Kalibriermessungen verwendete Laborsystem ein, zeigen die angewandten Verfahren zur Qualitätssicherung der erzeugten Felder und führen schließlich ein Verfahren zur automatisierten Messwertgewinnung ein.

Kapitel 3 behandelt dann verschiedene Analyseverfahren und Auswertetechniken. Hier wird zunächst ein lineares Modell der Eigenschaften eines Magnetometers vorgestellt sowie die Berechnung der Modellkoeffizienten dieses Modells behandelt. Einer der wesentlichen Aspekte dieser Abhandlung ist dabei ein Verfahren, das es erlaubt, bei einem Dreiachssensor die sogenannten „inneren Parameter“ von den „äußeren Parametern“ des Messaufbaus zu trennen und so zu erreichen, dass Kalibriermessungen, die an verschiedenen Orten unter unterschiedlichen äußeren Parametern des Messaufbaus an einem Magnetometer durchgeführt werden, vergleichbar werden.

Danach wird nach einer möglichst optimalen Auswahl von Testvektoren für die Berechnungen gesucht. Nach der Vorstellung weiterer Verfahren zur Bestimmung von Instrumentenparametern wie Nullpunkt (engl. Offset), des Einflusses der Temperatur auf den Sensor sowie anderer Aspekte einer Kalibrierung, wird zum Abschluss dieses Kapitels ein standardisiertes Verfahren einer Kalibriermessung vorgestellt, das bei allen weiteren Untersuchungen als Grundlage dient. Kapitel 4 behandelt die nichtlinearen Effekte. Hier wird zunächst ein Verfahren zur Bestimmung nichtlinearer Koeffizienten eines Magnetometers angegeben, im Anschluss daran werden alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Magnetometer kurz vorgestellt. Es folgt ein Vergleich der ermittelten Parameter der verschiedenen Instrumente.

Hierbei zeigt sich, dass das bisher verwendete Modell keinerlei Anhaltspunkte bietet,

---

<sup>2</sup>Eine Aufstellung aller dieser Instrumente findet sich im Abschnitt 4.4

unter welchen Umständen eine Charakterisierung des Magnetometers mittels einer Querfeldbeeinflussung notwendig ist. Deshalb wird im Kapitel 5 ein Modell für ein Magnetometer entwickelt, das die Beschreibung einer nichtlinearen Übertragungsfunktion zulässt, ohne dass in der Elektronik nichtlineare Effekte auftreten. Im Kapitel 6 folgen schließlich die Resultate von Messungen an Einzelsensoren, die an verschiedenen Magnetometersensoren durchgeführt wurden und von simulierten Messungen auf Grundlage des Modells aus Kapitel 5. Hierbei wird insbesondere der Einfluss der Lage des Ringkerns im Magnetometer sowie der Einfluss von Gradienten des Magnetfeldes über der Messzelle des Magnetometers untersucht. Das Kapitel schließt mit dem Vergleich einer Simulation eines Dreiachssensors und der Messung an einem solchen ab. Im Kapitel 7 folgt eine abschließende Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit.

## 2 Aufbau und Durchführung von Kalibriermessungen

**kalibrieren** [frz.].

- ◊ allgemein Messdaten mit geeichten [Primär oder Sekundär]normalen (z.T. unter konstanten Umweltbedingungen, z.B. in Klimakammern) vergleichen
- ◊ das Kaliber bestimmen, messen
- ◊ Meßgeräte eichen
- ◊ Werkstücke auf Maß bringen

(Aus: Meyers Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften, 1970)

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Kalibrierung eines Magnetometers beschrieben. Dazu wird zunächst die Methodik der Kalibriermessung und die Erzeugung so genannter Kalibriervektoren eingeführt (Kapitel 2.1). In einem zweiten Schritt werden anhand der Durchführung einer Kalibriermessung und der Auswertung der Kalibriervektoren erste Resultate der Methodik gezeigt (Kapitel 2.2). Die Vorgehensweise bei dieser Kalibriermessung ist naiv, weil alle Messgrößen als ideal, also als fehlerfrei angenommen werden. Dass dies sicher nicht der Fall ist, zeigt sich bereits bei der Auswertung.

Im Rest des Kapitels wird analysiert, unter welchen Voraussetzungen die Qualität der Kalibriervektoren im Laborsystem<sup>1</sup> sichergestellt werden kann. Nach Einführung der in den weiteren Kapiteln verwendeten Koordinatensysteme in Abschnitt 2.3, behandelt Abschnitt 2.4 zunächst die Qualität der Kalibriervektoren aus Sicht des Laborsystems. Dabei wird insbesondere auf mögliche Fehlerquellen eingegangen, und es werden Maßnahmen aufgezeigt, solche Fehler zu vermeiden oder zu korrigieren. Im Abschnitt 2.5 wird ein Verfahren entwickelt, das eine Automatisierung des Prozesses zur Gewinnung von Kalibriervektoren erlaubt. Dies Verfahren hilft dabei, sehr viele Kalibriervektoren gleichbleibender Qualität zu erzeugen. Mögliche Auswerteverfahren von Kalibriermessungen werden in den Kapiteln 3 und 4 behandelt.

---

<sup>1</sup>Gemeint ist der Ort, an dem die Kalibriermessung stattfindet.

## 2.1 Idee und Prinzip einer Kalibriermessung

Direkte Messungen erweisen sich als recht probates Mittel, die Verhaltensweise eines Magnetometers zu untersuchen und zu beschreiben. Allerdings ist es hierfür notwendig, dass diese Messungen, mit prinzipiell gleichbleibender Qualität wiederholt durchgeführt, vergleichbare Resultate liefern. Viele Autoren, zum Beispiel [Aschenbrenner/Goubau 1936, Ness 1970, Huber 1973, Acuña et al. 1978, Primdahl 1979, Lühr 1980, Acuña 1981, Kupke 1984, Lühr 1984, Kügler 1992, Afanasjew 1994, Brauer 1997, Korth 1998, Kuhnke et al. 1998], haben sich mit der Funktionsweise von Magnetometern und ihrer Kalibrierung beschäftigt.

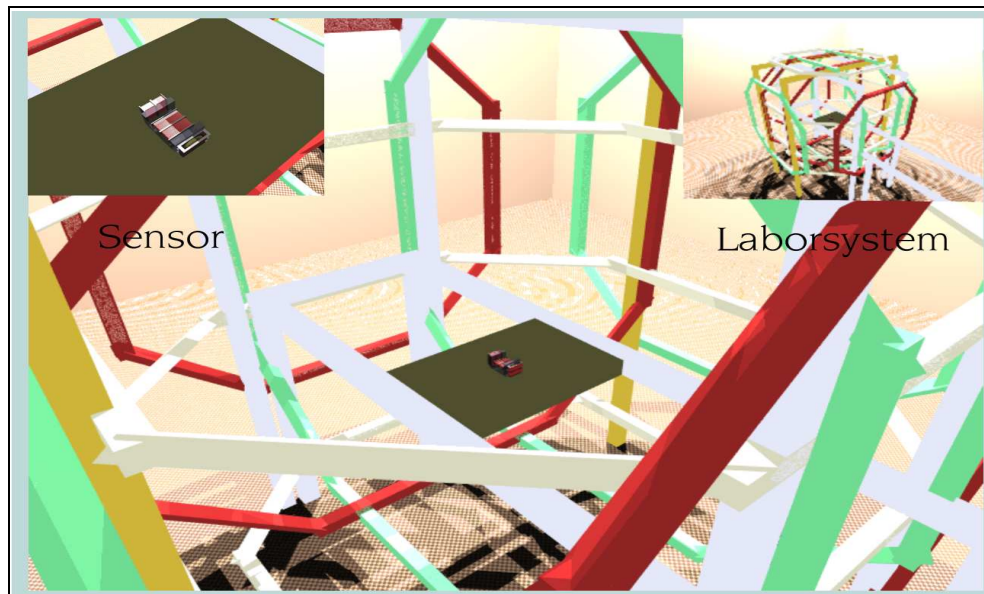


Abbildung 2.1: Schematische Ansicht eines Laborsystems. In diesem System ist bereits der Sensor des zu untersuchenden Instruments platziert. Das kleine Bild oben links zeigt eine Ausschnittvergrößerung mit dem Sensor im Mittelpunkt. Das kleine Bild oben rechts zeigt eine vollständige Ansicht des Laborsystems.

Eine Methode der Kalibrierung basiert auf Messungen in einem Laborsystem. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft den Sensor eines zu untersuchenden Instruments in einem Laborsystem. Das zu untersuchende Instrument wird dabei unter bekannten Laborbedingungen definierten Magnetfeldkonfigurationen<sup>2</sup> ausgesetzt. Die definierten Magnetfeldkonfigurationen des Laborsystems dienen als Referenz. Richtung und Stärke des im Laborsystem herrschenden Magnetfeldes, sowie die Temperatur und die Antwort des zu untersuchenden Instruments auf diese „Umgebung“ werden registriert. Das Laborsystem muss deshalb in der Lage sein, das Magnetfeld in dem für das Instrument relevanten Frequenzbereich zu kontrollieren.

<sup>2</sup>Sowohl die Stärke als auch die Richtung des im Laborsystem herrschenden Magnetfeldvektors ist zu jeden Zeitpunkt bekannt.

Abbildung 2.2 illustriert den vollständigen Ablauf einer Kalibriermessung schematisch. Die unterschiedlichen Magnetfeldkonfigurationen werden mittels der „Ansteuerung“ im Laborsystem eingestellt und geregelt. Die Antwort des untersuchten Instruments und die erfassten Umweltparameter, wie z.B. die Temperatur innerhalb des Laborsystems werden mittels der „Datenerfassung“ registriert und in der „Auswertung“ bewertet. Die Auswertung der erfassten Daten liefert in einem noch zu entwickelnden Modell Korrekturgrößen. Diese erlauben eine verbesserte Beschreibung der Charakteristik des untersuchten Instruments.

Falls das untersuchte Instrument als Referenz benutzt wird, ermöglichen die ermit-

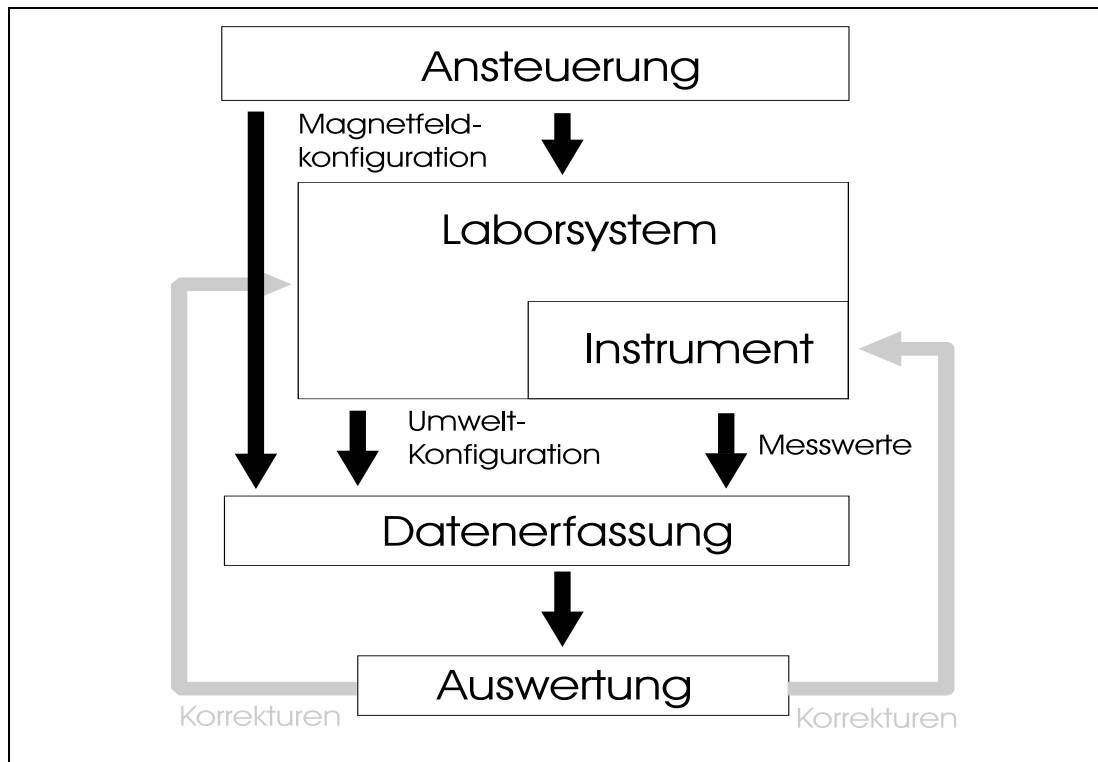


Abbildung 2.2: Ablauf einer Kalibriermessung (schematisch)

telten Korrekturgrößen eine verbesserte Abschätzung möglicher Fehlerquellen, die die Genauigkeit des im Laborsystem zu messenden Magnetfeldes beeinflussen. Der schematische Ablauf einer Kalibriermessung unter Laborbedingungen sieht nach Schema in Abbildung 2.2 wie folgt aus:

1. Platzieren des Instruments im Inneren des Laborsystems
2. Einstellen einer Magnetfeldkonfiguration im Laborsystem
3. Warten bis das Laborsystem einen definierten eingeschwungenen Zustand erreicht hat
4. Warten bis das Instrument einen definierten eingeschwungenen Zustand erreicht hat

5. Erfassen der Magnetfeldkonfiguration und der Messwerte des Instruments als Datenvektor
6. Fortfahren ab Schritt 2 bis eine ausreichende Anzahl an Datenvektoren gewonnen wurde

Die für jeden Messschritt erzeugten Datenvektoren aus Instrumentendaten und Laborsystemdaten, im Weiteren Kalibriervektoren genannt, bilden die Grundlage der weiteren Auswertung.

## 2.2 Eine einfache Kalibrierung (Fallbeispiel)

Das oben vorgestellte Prinzip einer Kalibrierung wird im Folgenden anhand einer „einfachen Kalibrierung“ erläutert<sup>3</sup>. Es wird von folgendem Szenario ausgegangen: Das Verhalten eines gegengekoppelten Ring-Saturationskern-Magnetometers (engl. Ringcore-Fluxgate-Magnetometer), das für den Einsatz im Weltraum entwickelt und gebaut wurde, wird zuvor am Boden in einem Labor überprüft. Es soll verifiziert werden, ob das Instrument die gestellte Spezifikation erfüllt. Ferner soll die Übertragungsfunktion des Instruments exakt bestimmt werden.

Folgt man der Theorie zur Funktionsweise von Fluxgate-Magnetometern, wie sie zum Beispiel bei Kertz [Kertz 1969] dargestellt wird, so ist eine lineare Antwortfunktion des gegengekoppelten Magnetometers auf unterschiedliche Magnetfeldkonfigurationen zu erwarten. Um dies untersuchen zu können, ist es notwendig, im Labor wohl definierte und stabile Gleichfeldmagnetfelder zu erzeugen und zu messen. Für einen ersten Ansatz eines Kalibriermodells (im Weiteren K-Modell) wird zunächst davon ausgegangen, dass es sich bei dem Koordinatensystem, in der die Magnetfeldkonfiguration des Laborsystems beschrieben wird, um ein ideales rechthändiges kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen  $U, V, W$  handelt. Das Magnetfeld ( $\underline{b}$ ) wird in diesem Koordinatensystem in den Komponenten  $u, v, w$  angegeben. Das Koordinatensystem, in dem das Magnetometer (Instr) misst wird mit den Achsen  $X, Y, Z$  bezeichnet und ist sicher aufgrund der mechanischen Fertigung nicht ideal. Seine Komponenten heißen  $x, y, z$ . Der lineare Ansatz führt mit der obigen Nomenklatur zu den folgenden Formeln:

$$b_{\text{Instr},x} = a_{x,1}b_u + a_{x,2}b_v + a_{x,3}b_w, \quad (2.1)$$

$$b_{\text{Instr},y} = a_{y,1}b_u + a_{y,2}b_v + a_{y,3}b_w, \quad (2.2)$$

$$b_{\text{Instr},z} = a_{z,1}b_u + a_{z,2}b_v + a_{z,3}b_w \quad (2.3)$$

oder in vektorieller Schreibweise

$$\underline{b}_{\text{Instr}} = \underline{\underline{A}} \underline{b}_{\text{Labor}}. \quad (2.4)$$

Die ermittelten Übertragungskoeffizienten  $a_{\dots,1}$ ,  $a_{\dots,2}$  und  $a_{\dots,3}$  sind spezifisch für alle vom Laborsystem in einem Testaufbau erzeugten Feldkonfigurationen. Durch Variation der im Laborsystem erzeugten Magnetfelder  $b_u, b_v, b_w$  und der Registrierung der

---

<sup>3</sup>Dieses Beispiel führt lediglich in die in dieser Arbeit behandelte Aufgabenstellung ein. Eine ausführliche Behandlung der einzelnen Aspekte erfolgt in den weiteren Kapiteln.

## 2 Aufbau und Durchführung von Kalibriermessungen

Antwort des untersuchten Instruments lassen sich die Übertragungskoeffizienten der Matrix  $\underline{\underline{\mathbf{A}}}$  bestimmen. Sollen zum Beispiel die Übertragungskoeffizienten  $a_{x,1}$ ,  $a_{x,2}$ ,  $a_{x,3}$  aus  $N$  Messungen ermittelt werden so ergibt sich formal:

$$\begin{pmatrix} b_{u,1} & b_{v,1} & b_{w,1} \\ b_{u,2} & b_{v,2} & b_{w,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{u,N} & b_{v,N} & b_{w,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{x,1} \\ a_{x,2} \\ a_{x,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{x,1} \\ b_{x,2} \\ \vdots \\ b_{x,N} \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

$\underline{\underline{\mathbf{B}}} \qquad \underline{\mathbf{x}} \qquad \underline{\mathbf{m}}$

Die Koeffizienten  $a_{x,1}$ ,  $a_{x,2}$ ,  $a_{x,3}$  des Vektors  $\underline{\mathbf{x}}$  werden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Hierzu wird in formaler Schreibweise das Abstandsquadrat  $Q(\underline{\mathbf{x}})$  eingeführt:

$$Q(\underline{\mathbf{x}}) = (\underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{m}})^T (\underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{m}}) = \underline{\mathbf{x}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{m}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{x}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\mathbf{m}} + \underline{\mathbf{m}}^T \underline{\mathbf{m}}. \quad (2.6)$$

Damit  $Q(\underline{\mathbf{x}})$  minimal ist, müssen alle Ableitungen nach  $x_i$  verschwinden. Es muss also gelten:

$$\underline{\nabla} Q(\underline{\mathbf{x}}) = 0. \quad (2.7)$$

Damit ergibt sich für Gl.(2.6):

$$\underline{\nabla} Q(\underline{\mathbf{x}}) = \underline{\nabla} (\underline{\mathbf{x}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{m}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{x}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\mathbf{m}} + \underline{\mathbf{m}}^T \underline{\mathbf{m}}) \quad (2.8)$$

$$= 2 \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} - 2 \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\mathbf{m}} \stackrel{!}{=} 0. \quad (2.9)$$

Somit ist

$$\underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\mathbf{x}} = \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\mathbf{m}}. \quad (2.10)$$

Sofern die Matrix  $\underline{\underline{\mathbf{B}}}$  den Spaltenrang besitzt, folgt daraus, dass sich die Matrix  $\underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}$  invertieren lässt und man erhält als Lösungsvektor:

$$\underline{\mathbf{x}} = (\underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}})^{-1} \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\mathbf{m}}. \quad (2.11)$$

Entsprechendes gilt für die Parameter in den Gl.(2.2) und Gl.(2.3). Eine Lösung dieses Gleichungssystem wird gefunden, wenn im Laborsystem zumindest drei linear unabhängige Vektoren erzeugt und vom Magnetometer gemessen werden. Eine bessere Qualität der bestimmten Parameter erhält man aber erst, wenn der Bereich, in dem das Magnetometer misst, gleichmäßig mit möglichst vielen Messpunkten abgedeckt wird. Die ermittelten Koeffizienten bilden die „beste“ Anpassung des linearen Modells. Die Lösung des überbestimmten linearen Gleichungssystems wird im Abschnitt 3.2.1 noch einmal unter dem Aspekt behandelt, ein solches System für Gleichungssysteme mit  $N > 300$  ohne eine explizite Berechnung des Ausdrucks  $(\underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}})^{-1}$  zu lösen. In einem Messsystem, in dem die Felder im Labor manuell eingestellt und die so eingestellten Felder sowie die Antwort des Magnetometers manuell notiert werden, ist die Zahl, der pro Untersuchung einstellbaren Magnetfelder, häufig stark begrenzt. Zudem ist es notwendig, bei einer manuellen Abarbeitung eines Messprogramms Fehlerquellen, die insbesondere durch Schreibfehler entstehen, weitgehend zu eliminieren. Aus



diesem Grund wird eine sogenannte „Achsenmessung“ durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Messung, bei der magnetische Kunstfelder unterschiedlicher Stärke auf jeweils nur eine Achse des Laborsystems geschaltet werden. Der manuellen Arbeitsweise kommt dabei die Abarbeitung der folgenden Messequenz entgegen:

1. Nullfeld auf alle Achsen U,V,W schalten
2. Felder auf die U–Achse schalten. Mit dem kleinsten Feld  $\text{Min}_u$  beginnend bis zu einem größten Feldwert von  $\text{Max}_u$  mit einer Schrittweite vom  $s_u$ . Auf die Achsen V und W wird kein zusätzliches Feld geschaltet.
3. Nullfeld auf alle Achsen schalten
4. Felder auf die V–Achse schalten. Mit dem kleinsten Feld  $\text{Min}_v$  beginnend bis zu einem größten Feldwert von  $\text{Max}_v$  mit einer Schrittweite vom  $s_v$ . Auf die Achsen U und W wird kein zusätzliches Feld geschaltet.
5. Nullfeld auf alle Achsen schalten
6. Felder auf die W–Achse schalten. Mit dem kleinsten Feld  $\text{Min}_w$  beginnend bis zu einem größten Feldwert von  $\text{Max}_w$  mit einer Schrittweite vom  $s_w$ . Auf die Achsen U und V wird kein zusätzliches Feld geschaltet.
7. Nullfeld auf allen Achsen schalten

Abbildung 2.3 illustriert die Feldsequenz einer solchen Achsenmessung. Auf der linken Seite der Abbildung ist über der Kalibrierschrittnummer das im Laborsystem erzeugte Magnetfeld aufgetragen. Die rechte Seite der Abbildung zeigt die Antwort des untersuchten Instruments. Die Feldwerte eines Kalibrierschrittes des Laborsystems bilden hierbei jeweils einen Testvektor. Die Antwort des Instruments besteht dabei aus den Antworten der X–, Y– und Z–Komponente des Instruments. In dieser Darstellung ist bereits deutlich erkennbar, dass versucht wird, das Instrument „quasi parallel“ zum Laborsystem auszurichten. „Versucht“ deshalb, weil es offensichtlich nicht immer gelingt. So ist auffällig, dass die Antwort des Instruments auf die Felder in den einzelnen Achsen immer ein entgegengesetztes Vorzeichen hat.

Aus Sicht des Instruments werden aus  $-65000$  nT angelegtem Feld in der U-Achse des Laborsystems etwa  $65000$  nT Feld in seiner X–Richtung. Gleiches gilt entsprechend für die anderen Achsen. Damit ergibt sich als Näherung die folgende einfache Übertragungsmatrix:

$$\underline{b}_{\text{Instr}} \approx \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \underline{b}_{\text{Labor}} = \underline{A}_{\text{approx}} \underline{b}_{\text{Labor}} \quad (2.12)$$

Die Determinante dieser Matrix ist  $-1$ . Das Instrument spannt ein linkshändiges Koordinatensystem auf. Für die weiteren Betrachtungen erweist es sich als sinnvoll, die Felder im Laborkoordinatensystem mit eben dieser Matrix  $\underline{A}_{\text{approx}}$  zu multiplizieren, da so die Eingangsgrößen des Laborsystems direkt mit den Ausgangsgrößen des Instruments vergleichbar werden.

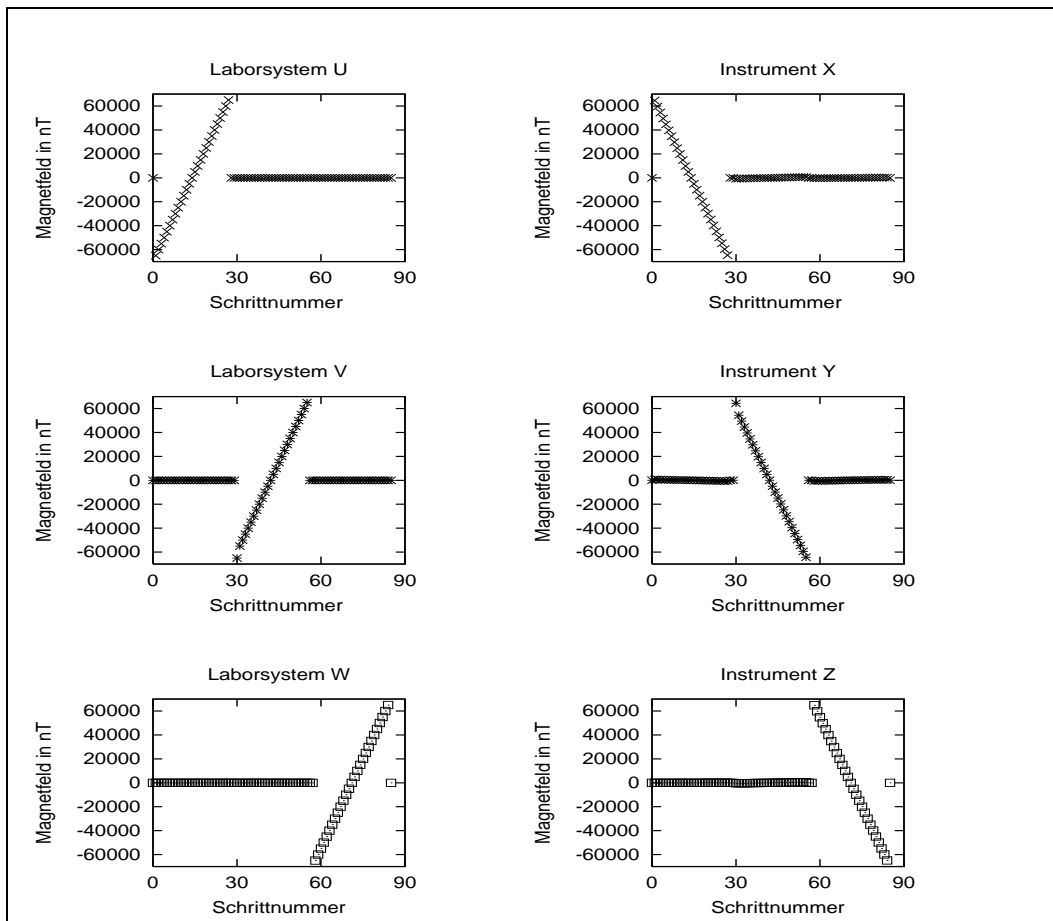


Abbildung 2.3: „Achsenmessung“: Auf der linken Seite sind die Eingangsfelder des Laborsystems über den Kalibrierschritten aufgetragen, auf der rechten Seite die Antwort des untersuchten Instruments.

Dies ist in der linken Spalte von Abbildung 2.4 dargestellt. Die mittlere Spalte (Differenz A) zeigt komponentenweise die Differenz nach Subtraktion der Messwerte des Instruments, von denen der Eingangsgröße, also Differenz  $A = \underline{b}_{\text{Labor}} - \underline{b}_{\text{Instr}}$ . Im Gegensatz zur Abbildung 2.3 sind in dieser Darstellung die Abweichungen zwischen Laborsystem und Instrument von maximal 800 nT / 65000 nT  $\approx 1.2$  Prozent, bezogen auf das maximal im Laborsystem erzeugte Feld deutlich zu erkennen. Wendet man  $\underline{A}_{\text{approx}}$  auf  $\underline{b}_{\text{Labor}}$  an und führt dann eine Bestapproximation im Quadratmittel mit linearen Koeffizienten durch, so ergeben sich nach Subtraktion der Instrumentenwerte von den Modellwerten die in der rechten Spalte (Differenz B) gezeigten Restfelder. Anhand der Untersuchung dieser Restfelder lässt sich eine Aussage gewinnen, inwieweit das untersuchte Instrument seiner geforderten Spezifikation entspricht. Sind die maximalen Abweichungen größer als die in der Spezifikation angegebenen Werte, so ist die Spezifikation sicher nicht erfüllt, beziehungsweise das angesetzte Modell passt nicht. Bei einer guten Anpassung des Modells an die Messungen ist zu erwarten, dass die Restfelder nach einer Anpassung eines Modells, aufgetragen über einem der Eingangsparameter, keinerlei feldabhängige Strukturen aufweisen. Werden solche Strukturen wie in

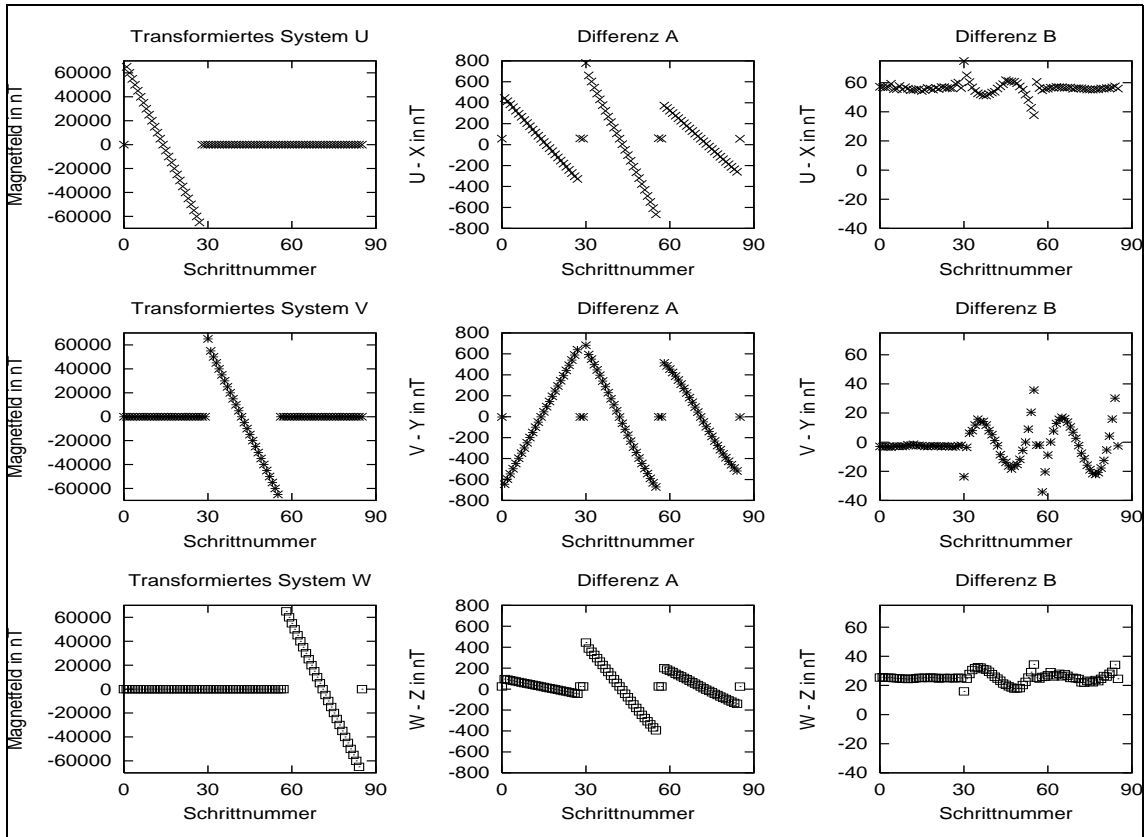


Abbildung 2.4: Anpassung verschiedener Modelle

diesem Fall entdeckt, ist dies ein sicheres Zeichen dafür, dass das benutzte Modell die Messwerte nicht optimal beschreibt und weitere systematische Effekte eine Rolle spielen.

Die Restfelder der  $X$ -Komponente des untersuchten Instruments zeigen einen nicht-linearen Verlauf nur für den Fall, dass in der  $V$ -Achse des Laborsystems Felder geschaltet werden. Die  $V$ -Achse liegt senkrecht zur eigentlichen Messrichtung der  $X$ -Komponente, und deshalb sollte die  $X$ -Komponente eigentlich unempfindlich gegen Felder aus dieser Richtung sein. In der Literatur wird dieser Effekt unter dem Titel „Querfeldnichtlinearität“ behandelt [Acuña et al. 1978]. Es handelt sich dabei um einen Effekt, der an manchen Ringkern-Fluxgate-Magnetometern, die vor einem großen Hintergrundmagnetfeld betrieben werden, beobachtet werden kann.

Der nichtlineare Restfehler bewegt sich in einer Größenordnung von bis zu 0.06 Prozent, bezogen auf das maximal im Laborsystem erzeugte Feld. Im Umkehrschluß bedeutet dies, dass die Linearität des untersuchten Instruments besser als 0.1 Prozent ist. Interessant wird es zum Beispiel, wenn an das Instrument eine Anforderung an die Genauigkeit von 8 nT vor einem Hintergrundfeld von 65000 nT gestellt wird. Formal erfüllt das hier vorgestellte Instrument diese Spezifikation nicht. Ist es möglich, die Messwerte des Instruments mittels eines analytischen Verfahrens so zu korrigieren, dass das Instrument die Spezifikation erfüllt? Wo liegen die Ursachen für ein solches Verhalten? Ist es ferner möglich, durch eine technische Verbes-

serung/Weiterentwicklung ein solches Verhalten bei Bau von Instrumenten zukünftig zu vermeiden?

Geht man zur Beantwortung dieser Fragen von der im Beispiel verwendeten „einfachen Kalibrierung“ aus, so ist zunächst einmal die Qualität der Kalibriervektoren sicherzustellen. Die folgenden Abschnitte widmen sich genau dieser Fragestellung.

### 2.3 Verwendete Koordinatensysteme

Für alle weiteren Betrachtungen des oben beschriebenen Verfahrens einer Kalibriermessung ist es wesentlich, geeignete Koordinatensysteme zu verwenden. Zur Beschreibung der Magnetfelder im Laborsystem wird ein kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen  $U$ ,  $V$ ,  $W$  und den ihnen entsprechend zugeordneten Einheitsvektoren  $\underline{e}_U$ ,  $\underline{e}_V$ ,  $\underline{e}_W$  benutzt. Da die Stärke und Richtung eines Magnetfeldvektors an einem Aufpunkt im Laborsystem aber unter Umständen auch von der mechanischen Position des Aufpunktes abhängt, ist es notwendig, ein zweites kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen  $U_L$ ,  $V_L$ ,  $W_L$  und den Einheitsvektoren  $\underline{e}_{U_L}$ ,  $\underline{e}_{V_L}$ ,  $\underline{e}_{W_L}$  einzuführen, das achsenparallel zum  $UVW$ -System liegt. Typischerweise werden einem zu untersuchenden Instrument (Instr) ebenfalls zwei eigene Koordinatensysteme zugeordnet. Im sogenannten mechanischen Koordinatensystem kann jedem Bauteil eines Sensors eine eindeutige geometrische Position und Lage zugeordnet werden. Dies Koordinatensystem ist ebenfalls kartesisch mit den Achsen  $X_{\text{mech}}$ ,  $Y_{\text{mech}}$ ,  $Z_{\text{mech}}$  und den Komponenten  $\underline{e}_{x_{\text{mech}}}$ ,  $\underline{e}_{y_{\text{mech}}}$ ,  $\underline{e}_{z_{\text{mech}}}$ . Von diesem Koordinatensystem ist das instrumenteneigene Koordinatensystem zu unterscheiden, in dem das vom Instrument gemessene Magnetfeld angegeben wird. Ihm wird ein Koordinatensystem mit den Achsen  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  und den Komponenten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  zugeordnet. Es ist im allgemeinen schiefwinklig und steht zunächst auch in keiner wohl definierten Beziehung zu den übrigen Koordinatensystemen.

### 2.4 Laborsystem zur Untersuchung von Magnetometern

#### 2.4.1 Anforderungen

Werden in einen Laborsystem zum Beispiel Magnetometer untersucht, die auf Satelliten eingesetzt werden sollen, so ist häufig eine Reproduzierbarkeit der Messungen von besser als 1 nT gefordert. Damit eine derartige Genauigkeit unter den an der Erdoberfläche herrschenden Magnetfeldbedingungen erzielt werden kann, ist das zu untersuchende Magnetometer vor dem Einfluss störender Umgebungsmagnetfelder zu schützen. Folgende Anteile sind dabei zu berücksichtigen:

- Internes Erdmagnetfeld und Krustenmagnetisierung
- Externes Magnetfeld (hervorgerufen durch magnetosphärische und ionosphärische Stromsysteme)

- Feldanteil durch induzierte Stromsysteme im Untergrund
- Magnetfeldquellen zivilisatorischer Herkunft (magnetisiertes Eisen, elektrische Ströme etc.)

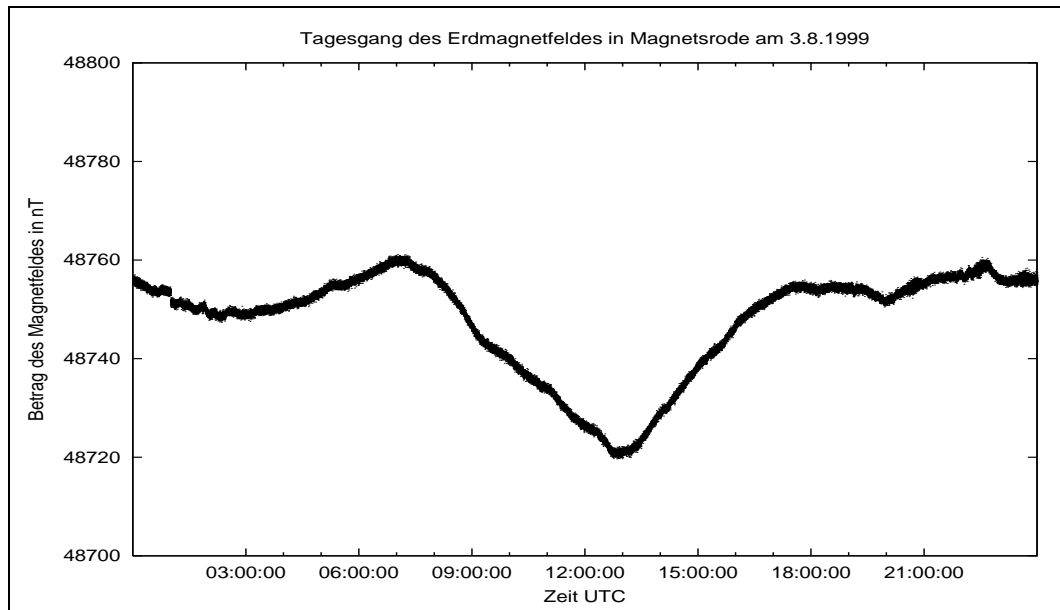


Abbildung 2.5: Variation des Erdmagnetfeldes an einem „magnetisch ruhigen“ Tag

Das Umgebungsmagnetfeld erweist sich daher als orts- und zeitvariabel in Stärke und Richtung. Einen Eindruck dieser Variabilität vermittelt Abbildung 2.5. Sie zeigt die Änderung der Totalintensität des Erdmagnetfeldes im Verlauf eines magnetisch ruhigen Tages. Das bei dieser Messung verwendete Magnetometer ist an einem Ort platziert, an dem Störungen des Magnetfeldes durch zivilisationsbedingte Magnetfeldquellen, wie beispielsweise dem Einfluss sich bewogender Autos oder benachbarter Starkstromkabel, weitgehend vermieden werden. Der Einfluss des Umgebungsmagnetfeldes kann mittels einer Abschirmung durch ein hochpermeables Metall (MU-Metall) unterdrückt werden. Dies gelingt, wenn das MU-Metall das zu untersuchende Magnetometer vollständig umschließt und die zu unterdrückenden Magnetfelder das MU-Metall selbst nicht in die Sättigung treiben. Eine weitere Möglichkeit, das Hintergrundmagnetfeld zu eliminieren besteht darin, an der Stelle, an der das zu untersuchende Instrument platziert ist, ein dem Hintergrundmagnetfeld entgegengerichtetes Magnetfeld zu überlagern. Dies kann durch eine geeignete Anordnung von Stabmagneten erreicht werden, bei der allerdings nur eine statische Kompensation des Hintergrundmagnetfeldes gelingt. Soll das Hintergrundfeld zudem dynamisch kompensiert werden, so bietet sich die Verwendung von Spulen zur Erzeugung des Kompensationsmagnetfeldes an. Dieselben Spulen können auch zur Erzeugung zusätzlicher Magnetfelder verwendet werden. Um einen Magnetfeldgradienten über dem zu untersuchenden Instrument zu vermeiden, ist es außerdem notwendig am Ort des Instruments ein möglichst homogenes Magnetfeld zu erzeugen.

### 2.4.2 Das Laborsystem „Magnetsrode“

Das Institut für Geophysik und Meteorologie betreibt in seinem Magnetfeldlaboratorium „Magnetsrode“<sup>4</sup> ein Spulensystem. Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über das Gesamtsystem und seine verwendeten Komponenten, ohne auf alle vorhandenen Hilfssysteme einzugehen (siehe hierfür Anhang A). Das zu untersuchende Magnetometer wird im Dreiachs–Braunbekspulensystem entweder direkt oder in einer thermalen Isolierung platziert. Das Dreiachs–Braunbekspulensystem bildet das Herz der Anlage (weitere Ausführungen hierzu siehe Abschnitt 2.4.4). Es besteht aus drei Einachs–Braunbekspulensystemen, die jeweils einer Achse des Koordinatensystems  $U, V, W$  zugeordnet sind. Die drei Spulensysteme werden von Leistungsverstärkern betrieben (siehe auch Abschnitt 2.4.3).

Um das Erdmagnetfeld mit seinem quasi–statischen und dynamischen Anteilen im Inneren des Spulensystems kompensieren zu können, wird das Signal des in 50 m Entfernung in 2 m Tiefe im Erdboden (Bunker) vergrabenen mitmessenden Stationsmagnetometers ebenfalls von den Leistungsverstärkern invertiert und als zusätzlicher Strom auf die Spulen geschickt. Die für die Kalibriermessungen benötigten magnetischen Kunstfelder werden ebenfalls in den Leistungsverstärkern erzeugt und in die Spulen eingespeist. Mit der genauen Kenntnis der einzelnen Systeme und ihrem Zusammenwirken gelingt es letztlich, ein Modell zur Korrektur der bekannten Einflüsse zu entwickeln (siehe Abschnitt 2.4.6). Unter Verwendung aller Eingangsgrößen kann auf die tatsächlich in den Braunbeksystemen herrschenden Magnetfelder bzw. der Magnetfeldkonfiguration geschlossen werden.

---

<sup>4</sup>auf dem Gelände der FAL (Forschungsanstalt für Landwirtschaft) in Braunschweig

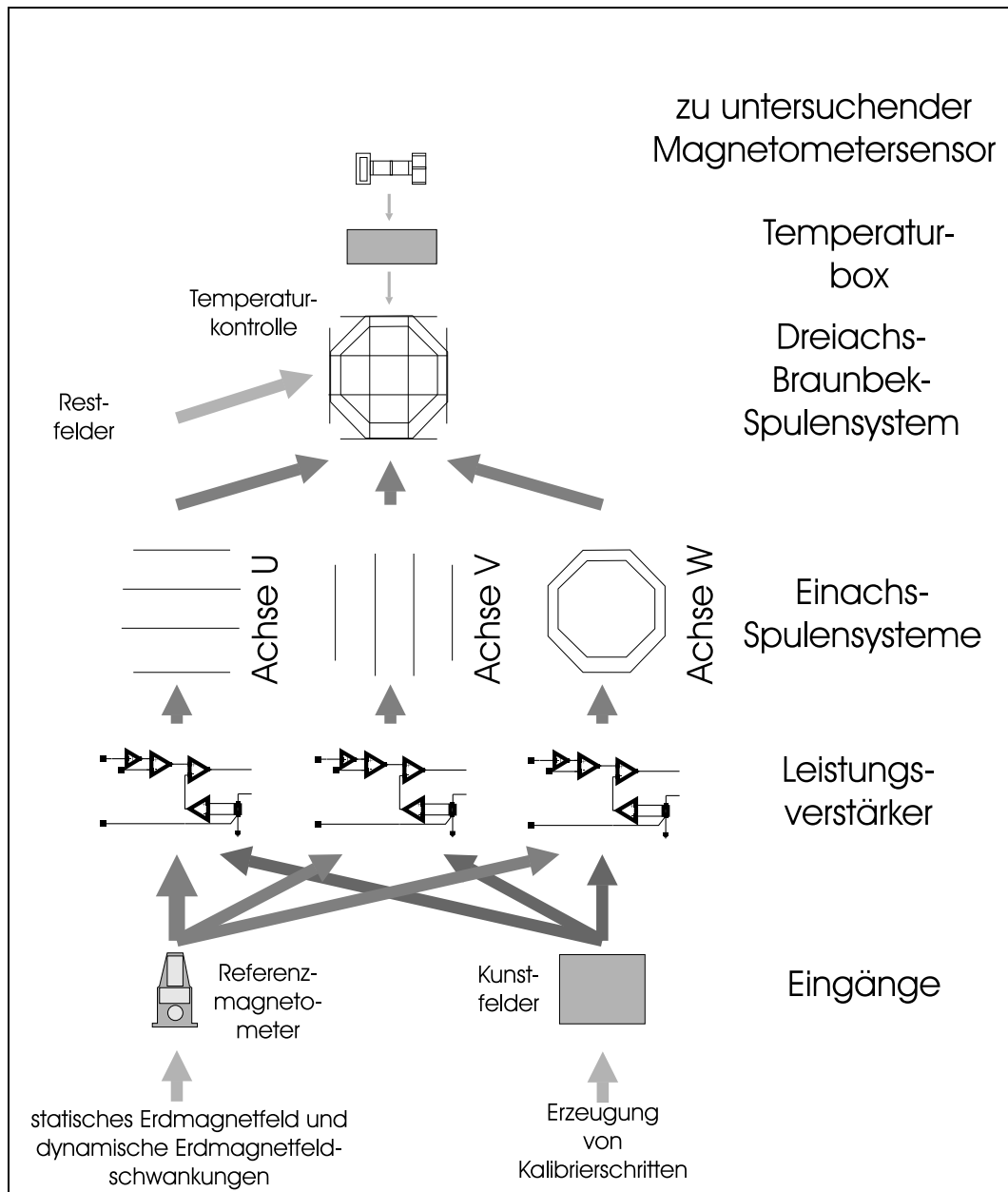


Abbildung 2.6: Aufbau von „Magnetorode“ schematisch

### 2.4.3 Leistungsverstärker

Das in Abbildung 2.7 gezeigte Funktionsschaltbild stellt den prinzipiellen Aufbau eines der zur Ansteuerung der Spulen verwendeten Leistungsverstärker dar. Im Spulensystem wird das Magnetfeld einer jeden Komponente  $b_u, b_v, b_w$  mittels eines Stromes  $I_u, I_v, I_w$  durch die entsprechenden Spulen erzeugt. Jeder Komponente  $b_u, b_v, b_w$  wird eine Raumrichtung und damit eine Komponente der Braunbekspulen zugeordnet. Der Strom  $I$  entsteht in jeder Komponente in einem Spannungs–Strom–Wandler (U/I–Wandler) durch die Transformation einer Eingangsspannung  $U$ . Das erzeugte Magnetfeld an einem Ort  $\underline{p}(u_L, v_L, w_L)$  ist damit proportional zur Eingangsspannung  $U$ . Über einen  $1\Omega$  Shunt–Widerstand wird der Strom  $I$  wieder in eine Spannung gewandelt und über einen Operationsverstärker rückgekoppelt. Das auf den U/I–Wandler aufgeschaltete Spannungssignal  $U$  besteht aus zwei Komponenten, dem zum Erdmagnetfeld  $\underline{b}_{\text{Erd}}$  proportionalen Signal des Referenzmagnetometers  $\underline{U}_{\text{RMag}}$  und dem Signal des Kunstfeldes  $\underline{U}_{\text{Kunst}}$ .

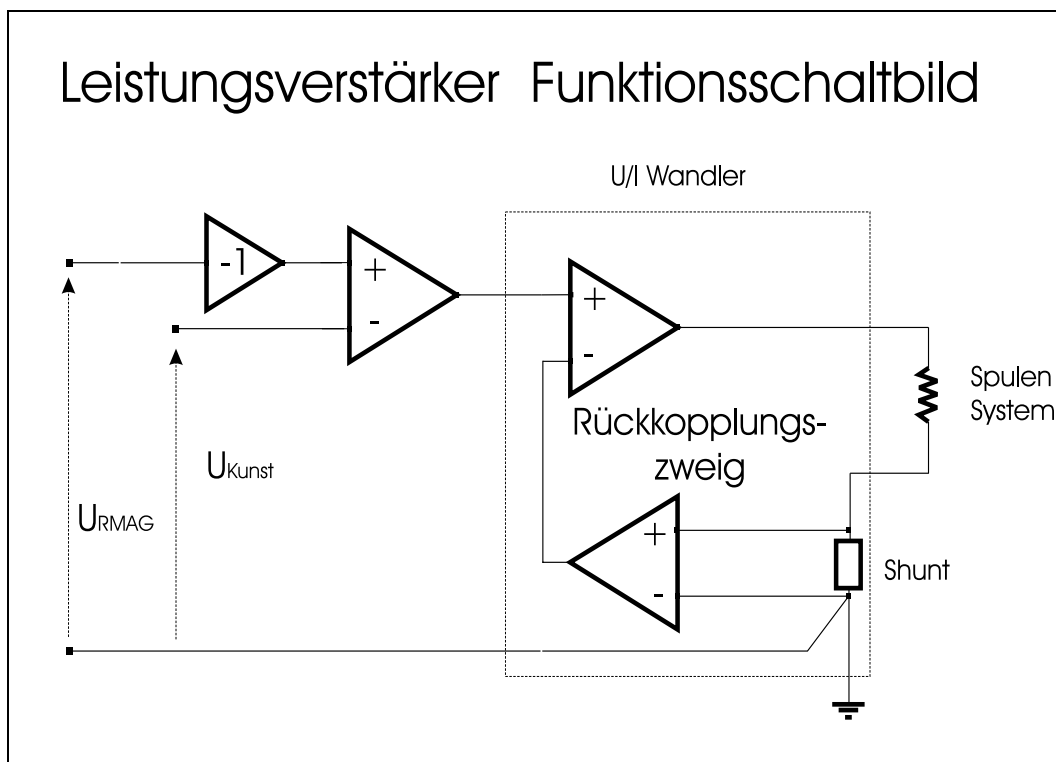


Abbildung 2.7: Schematischer Schaltungsaufbau des Verstärkers

**Anmerkung:** Die Genauigkeit, der durch die Leistungsverstärker erzeugten Ströme, ist die Grundvoraussetzung für Kompensation des Erdmagnetfeldes im Inneren der Braunbekspulensysteme. Geht man davon aus, dass im Zentrum der Spulen 1–2 nT Feld pro 1 mA Strom generiert werden, so ist es notwendig, dass der Verstärker Ströme der Stärke von 50–100 A mit einer Genauigkeit von  $100\ \mu\text{A}$  erzeugt.



### 2.4.4 Übertragungsfunktion und Homogenität der Braunbekspulen

Die magnetische Induktion eines stromdurchflossenen Leiters ergibt sich nach Biot–Savart in einem Aufpunkt  $p$  zu

$$d\mathbf{b} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_k}{r^3} d\mathbf{l} \times \mathbf{r} \quad (2.13)$$

in differentieller Form für ein infinitesimales Leiterstück oder

$$\mathbf{b} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k i_k \oint_k \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{1}_r}{r^2} \quad (2.14)$$

in integraler Form für ein Linienstromelement mit

- $\mathbf{b}$  magnetische Induktion
- $i_k$  Strom des  $k$ -ten Leiterelementes
- $r$  Abstand des Aufpunktes  $p$  vom Leiterstück
- $\mu_0$  magnetische Konstante  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
- $\mathbf{1}_r$  Einheitsvektor vom Leiterelement in Richtung des Aufpunktes
- $\mathbf{r}$  Abstandsvektor vom Leiterelement zum Aufpunkt
- $d\mathbf{l}$  infinitesimaler Abschnitt des Leiters

Damit besteht eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen der Stärke der magnetischen Induktion  $\mathbf{b}$  vom Abstand  $r$  zum Leiter. Diese Abhängigkeit sorgt dafür, dass nur bestimmte Geometrien einer Spulenordnung eine hinreichend homogene Feldkonfiguration erzeugen. Unter einer homogenen Magnetfeldkonfiguration wird in diesem Zusammenhang das räumliche Volumen verstanden, in dem das durch die Spulen erzeugte Magnetfeld quasi die gleiche Stärke und Richtung hat. Daher bezieht sich die Homogenität eines Bereiches immer auf einen Referenzpunkt  $\mathbf{p}_{\text{Ref}}$  in dem mechanischen Koordinatensystem der Spulen ( $U_L, V_L, W_L$ ). Für einen beliebigen Aufpunkt  $\mathbf{p}_{\text{Auf}}$  werden zur Bestimmung der Homogenität die Änderung der Stärke der magnetischen Induktion  $\mathbf{b}$  durch

$$h_1 = 1 - \frac{\|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Auf}})\|}{\|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Ref}})\|} \quad (2.15)$$

mit  $\|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Ref}})\| \neq 0$  und den Richtungswinkel  $h_2$  durch

$$h_2 = \arccos \left( \frac{\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Auf}})}{\|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Auf}})\|} \cdot \frac{\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Ref}})}{\|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Ref}})\|} \right) \quad (2.16)$$

mit  $\|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Ref}})\|, \|\mathbf{b}(\mathbf{p}_{\text{Auf}})\| \neq 0$  berechnet. Die Homogenität verbessert sich für

$$h_1, h_2 \rightarrow 0. \quad (2.17)$$

Eine homogene Feldkonfiguration entsteht zum Beispiel im Innenraum einer langen Zylinderspule (siehe Abbildung 2.8 A). Da der mechanische Zugriff auf das homogene Volumen im Innenraum von außen nur aus einer Richtung zugänglich ist, haben einige Autoren, zum Beispiel Helmholtz, Fanselau und Braunbek sich mit der Erzeugung

eines homogenen Magnetfeldes im Inneren einer Spulenkonfiguration beschäftigt, die einen einfachen mechanischen Zugriff auf das homogene Volumen erlauben. Helmholtz gelingt der Nachweis der Homogenität einer Konfiguration aus zwei kreisförmigen Spulen in der Helmholtz–Anordnung (siehe Abbildung 2.8 B) durch einen analytischen Ansatz. Fanselau verbessert die Homogenität der Helmholtz–Anordnung durch das Hinzufügen weiterer Spulen (siehe Abbildung 2.8 C). Braunbek schließlich optimiert die Helmholtz–Anordnung der Spulen, indem er die Radien der äußeren Spulen gegenüber den Radien der inneren Spulen verkleinert (siehe Abbildung 2.8 D). Zur Kompensation des Magnetfeldvektors am Ort des Laborsystems ist ein Spulen-

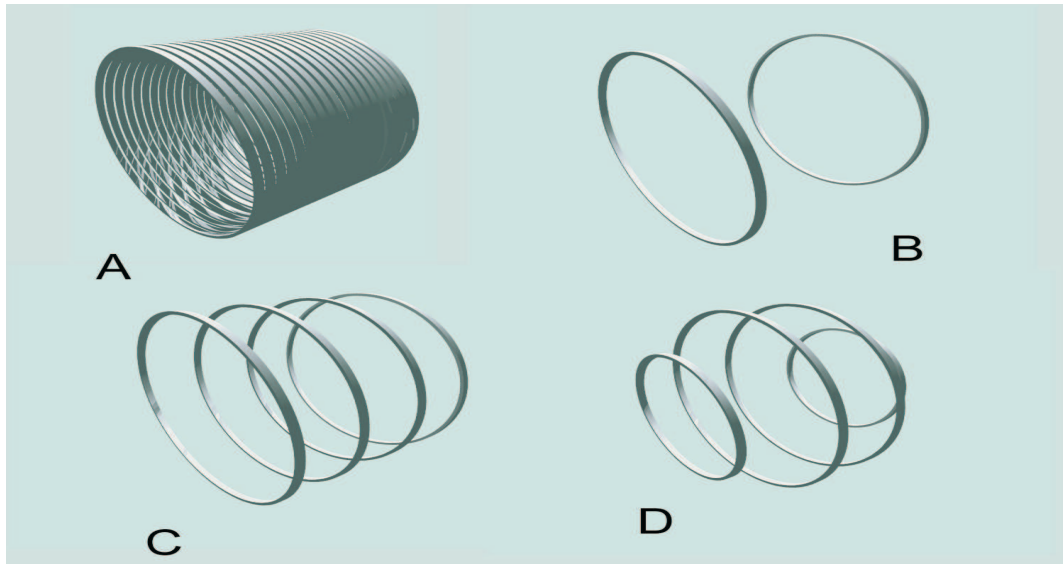


Abbildung 2.8: Verschiedene Spulenkonfigurationen

system notwendig, das in der Lage ist, einen Magnetfeldvektor in allen drei Raumrichtungen zu kompensieren. Hierzu ist es notwendig drei Spulenkonfigurationen zu kombinieren.

Abbildung 2.9 gibt in einer Simulation einen Überblick über den geometrischen Aufbau des in „Magnetsrode“ verwendeten Dreiachs–Braunbekspulensystems, sowie eine Zuordnung der einzelnen Einachs–Systeme zu den entsprechenden Laborachsen  $U, V, W$ . Die geometrische Form jeder einzelnen Spule ist achteckig. Dies stellt einen Kompromiss zwischen der Theorie, die ursprünglich auf der Grundlage von Kreisspulen berechnet wurde, und der Möglichkeit, eine große Spule mit einem Durchmesser von bis zu 1.8 m technisch fertigen zu können dar. Ebenso bedingt die technische Fertigung, dass die Spulen der drei Laborachsen nicht exakt die gleichen geometrischen Abmessungen haben. Im Anhang B werden die verwendeten geometrischen Abmessungen zur Simulation des im Spulenzentrum erzeugten Magnetfeldes angegeben.

Für alle weiteren Untersuchungen, die das Verhalten des Magnetometers betreffen, ist es notwendig, die Genauigkeit der im Laborsystem erzeugten Magnetfelder abschätzen zu können. Das Gesetz von Biot–Savart aus Gl.(2.13) und Gl.(2.14) erlaubt die Bestimmung einer Übertragungsfunktion, die den durch das Spulensystem fließenden Strom mit dem im Zentrum des Spulensystems durch ihn erzeugten Magnetfeld in

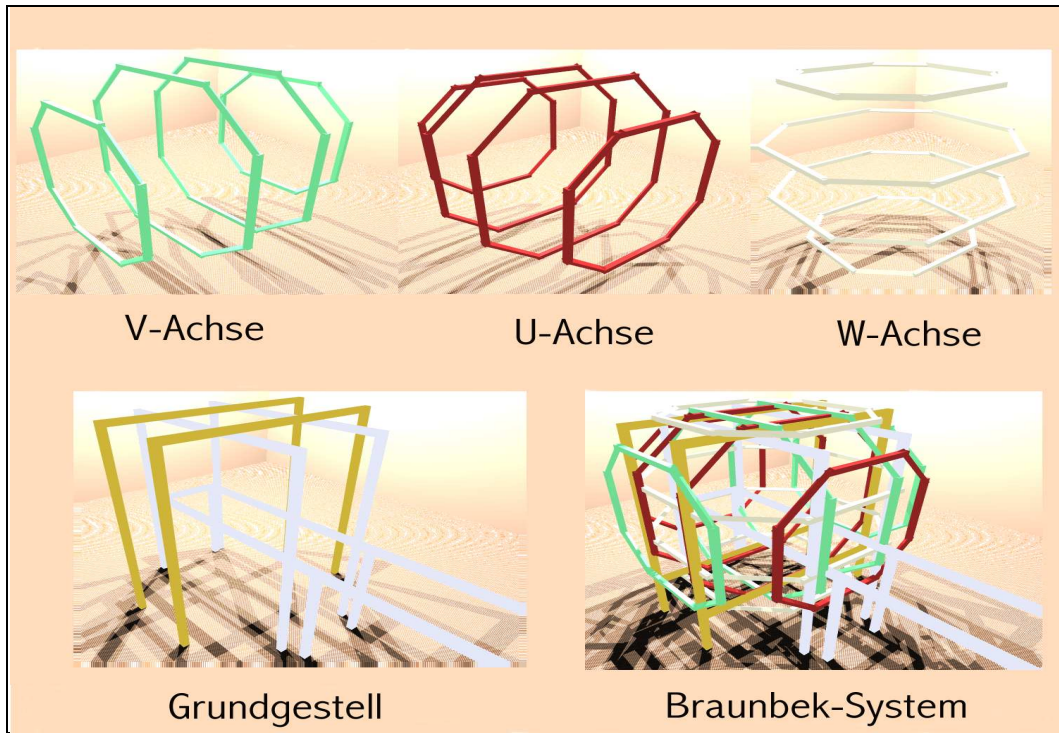


Abbildung 2.9: Aufbau des Braunbekspulensystems in „Magnetsrode“ (schematisch)

Beziehung setzt. Ausführliche Berechnungen zur Homogenität des Magnetfeldes in „Magnetsrode“ werden in [Rodemann 1972] durchgeführt. Rodemann nähert jede der achteckigen Spulen durch eine Kreisspule an und bestimmt die Homogenität des Feldes im Innenraum eines jeden Spulensystems durch die Näherung nach Fanslau. Seine Berechnungen beziehen sich dabei im Wesentlichen auf die Hauptachsen der Spulensysteme. Die von Rodemann durchgeführten Analysen werden in dieser Arbeit erweitert, um auch Aussagen über die Homogenität des Magnetfeldes an anderen Punkten innerhalb des Spulensystems treffen zu können. Hierzu wird das magnetische Verhalten aller drei Spulensysteme durch Linienstromelemente modelliert. Die Berechnung des in einem Aufpunkt erzeugten Magnetfeldes beziehungsweise der magnetischen Induktion erfolgt durch die numerische Summation der Beiträge der einzelnen Linienstromelemente. Um bei der Berechnung das Integral aus Gl.(2.14) nicht für jedes Leiterstück einzeln lösen zu müssen, wird es zunächst für ein Leiterstück der Länge  $l$  parallel zur  $V_L$ -Achse des Laborsystems berechnet. Hierbei ergibt sich nach kurzer Rechnung (siehe zum Beispiel [Musmann-Maeter 1989, Kügler 1992]):

$$B_u = B_{\text{Aufp}} \frac{W_a - w}{r}, \quad B_v = 0, \quad B_w = B_{\text{Aufp}} \frac{U_a - u}{r} \quad (2.18)$$

mit

$$B_{\text{Aufp}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left( \frac{l+v}{\sqrt{r^2 + (l+v)^2}} + \frac{l-v}{\sqrt{r^2 + (l-v)^2}} \right), \quad r = \sqrt{(U_a - u)^2 + (W_a - w)^2}, \quad (2.19)$$

## 2 Aufbau und Durchführung von Kalibriermessungen

wobei gilt:

$u, v, w$	Koordinaten des Aufpunktes in Laborsystemkoordinaten
$l$	Länge des Leiters
$U_a$	Abstand des Leiters von der $U$ -Achse
$W_a$	Abstand des Leiters von der $W$ -Achse
$B_{\text{Aufp}}$	Magnetfeld am Aufpunkt
$B_u$	magnetische Induktion in Richtung der $U$ -Achse
$B_v$	magnetische Induktion in Richtung der $V$ -Achse
$B_w$	magnetische Induktion in Richtung der $W$ -Achse
$I$	elektrische Stromstärke durch den Leiter
$r$	Abstand zwischen Leiter und Aufpunkt

Alle Leiterelemente, die nicht parallel zur  $V_L$ -Achse des Laborsystems liegen, werden zur Berechnung des Magnetfeldes in einem Aufpunkt in ein neues Koordinatensystem transformiert, das parallel zur  $V_L$ -Achse liegt. In diesem Koordinatensystem erfolgt die Bestimmung des Integrals. Nach seiner Berechnung werden die ermittelten Werte in das alte Koordinatensystem zurücktransformiert.

Unter Verwendung der im Anhang B angegebenen nominalen Spulenpositionen ergeben sich die in Tabelle 2.1 gezeigten Übertragungsfaktoren im Zentrum des Spulensystems.

Übertragungsfaktor in pT/mA pro Amperewindung Achse		
u	v	w
1676.61	1599.64	1677.12

Tabelle 2.1: Berechnete Übertragungsfaktoren im Zentrum des Spulensystems für Nominalpositionen der Spulen

Mittels einer „worst case“ Abschätzung kann auf die maximale Variabilität des Magnetfeldes innerhalb eines Volumens im Laborsystem geschlossen werden. Solange sich im Innenraum eines Volumens keinerlei Quellen für elektrische und magnetische Felder befinden, kann nach einem Satz der Potentialtheorie [Scott 1966, Lautz 1969, Kertz 1983] davon ausgegangen werden, dass die Extremalwerte des elektrischen und magnetischen Feldes auf der Oberfläche des eingeschlossenen Volumens erreicht werden. Diesen Zusammenhang macht sich das folgende Verfahren zur Abschätzung der Homogenität innerhalb des Braunbeksystems zu Nutze. Zunächst wird das von den Braunbekspulen im Zentrum der Anlage erzeugte Magnetfeld bestimmt, siehe Tabelle 2.1. In weiteren Schritten werden Kugelschalen mit wachsendem Radius  $r$  um dies Zentrum gelegt. Auf jeder der Schalenoberflächen werden die Extremalwerte des von dem Braunbekspulensystem erzeugten Magnetfeldes bestimmt. Aus diesen Extremalwerten werden im Anschluss die Parameter  $h_1$  und  $h_2$  aus Gl.(2.15) und Gl.(2.16) berechnet. So lässt sich direkt eine Abschätzung über die in einem Volumen maximal zu erwartende Abweichung des Magnetfeldes in Stärke und Richtung im Vergleich zum Zentrum gewinnen.

Abbildung 2.10 illustriert diese Vorgehensweise. Die obere Abbildung zeigt einen Ma-

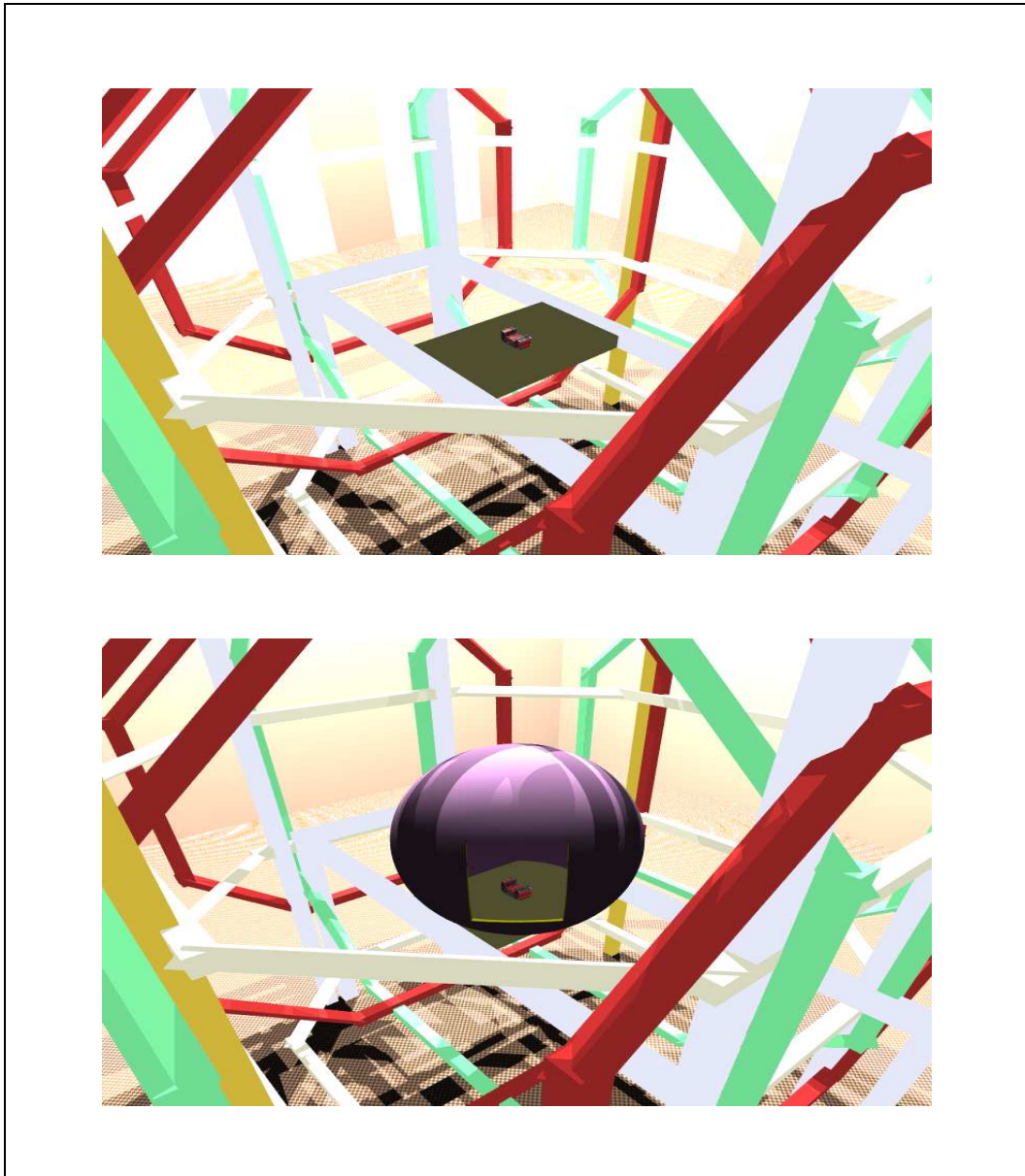


Abbildung 2.10: Illustration zur „Worst Case“ Abschätzung im Spulensystem

gnetfeldsensor, befestigt auf einer Montageplatte im Spulensystem. Die untere Abbildung zeigt noch einmal die gleiche Ansicht. Zusätzlich ist hier eine jener Kugelschalen gezeigt, auf denen die Maximalwerte der Abweichung des erzeugten Magnetfeldes im Vergleich zum im Zentrum erzeugten Magnetfeld bestimmt werden. Unter der Annahme, dass durch alle drei Achsen der Spulensysteme elektrischer Strom gleicher Stärke fließt, ergibt sich für die Maximalwerte der Parameter  $h_1$  (aus Gl.(2.15)) und  $h_2$  (aus Gl.(2.16)) das in Abbildung 2.11 gezeigte Bild. Hierbei werden die im Anhang B angegebenen „Nominalpositionen“ zur Positionierung der Spulen verwendet. Der Referenzpunkt befindet sich im gemeinsamen Zentrum der drei Spulensysteme. Die maximalen Abweichungen werden in einer logarithmischen Skala aufgetragen. Es zeigt sich, dass bei einer angestrebten Genauigkeit von besser als  $1 \cdot 10^{-4}$  der innere Bereich des Spulensystems mit einem Radius von etwa 25 cm eine für die weiteren Untersuchungen ausreichende Homogenität verspricht.

Der Einfluss, den mechanische Toleranzen bei der Fertigung und Montage des Spulensystems auf das Feld im Inneren haben, kann mittels weiterer Berechnungen, zum Beispiel einer Monte-Carlo-Simulation, abgeschätzt werden. Hierbei wird die oben beschriebene Worst-Case-Abschätzung unter zufälliger Variation der geometrischen Positionen innerhalb vorgegebener Toleranzen auf einzelne Modelle des Spulensystems angewendet. 200 Modelle werden so für jede der vorgegebenen Toleranzen analysiert und bewertet. Tabelle 2.2 zeigt einen Teilaspekt der gewonnenen Resultate. Hier sind die statistischen Parameter des in der Monte-Carlo-Simulation ermittelten Übertragungsfaktors im Zentrum der Spule für die  $U$ -Achse des Spulensystems in Abhängigkeit von der mechanischen Einbau- bzw. Fertigungstoleranz tabellarisch aufgetragen. Dabei ist es wenig überraschend, dass die Bandbreite möglicher Übertragungsfaktoren bei Vergrößerung der erlaubten Toleranz größer wird. Trägt man die Werte der größten ermittelten Abweichung für jede Toleranzklasse auf, so ergibt sich das in Abbildung 2.13 gezeigte Bild. Danach ist eine Einbautoleranz von besser als  $1 \cdot 10^{-5}$  m notwendig, um eine Genauigkeit von besser als  $1 \cdot 10^{-4}$  der Übertragungsfunktion zu gewährleisten. Eine solch hohe mechanische Genauigkeit ist typischerweise nicht erreichbar. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$  m. In diesem Bereich liegt die Abweichung des Übertragungsfaktors bereits bei 0.001. Die Folgerungen aus dieser Abschätzung werden weiter unten behandelt.

Betrachtet man die Homogenität des Magnetfeldes innerhalb der Spule, so zeigt sich, dass bereits eine absolute mechanische Genauigkeit von weniger als 1 mm ausreichend ist, die Homogenität auf einer Kugelschale mit dem Radius von 20 cm besser als  $10^{-4}$  zu garantieren (siehe Abbildung 2.12). Für die weiteren Betrachtungen kann davon ausgegangen werden, dass die absolute mechanische Genauigkeit bei  $10^{-4}$  m liegt und dass sich die mechanischen Positionen der Spulen zueinander nicht ohne die Einwirkung äußerer Kräfte ändern. Das komplette Spulensystem kann als statisch bezüglich äußerer mechanischer Belastungen betrachtet werden. Eine zumeist reversible Bewegung der Spulenteile zueinander entsteht bereits für den Fall, dass die Temperatur des Spulensystems variiert wird. Betrachtet man die Größenordnung, ab der eine mechanische Änderung der Geometrie signifikante Auswirkungen auf das im Inneren der Spulen erzeugte Feld hat, so wird der Einfluss bei Variation der Temperatur sofort deutlich. Die Spulenkörper des Spulensystems bestehen aus Aluminium. Dies hat einen Ausdehnungskoeffizienten von  $2.9 \cdot 10^{-5}$  m/K [Mende/Simon 1983]. Bezogen auf das

Spulensystem in „Magnetsrode“, das etwa eine maximale Kantenlänge einzelner Bauteile von 1.8–2.1 m hat, ergibt sich eine Ausdehnung von  $\approx 6 \cdot 10^{-5}$  m/K. Desweiteren werden die Stromstärken der Ströme durch die Änderung des spezifischen Widerstandes der Kupferleiter mit der Temperatur beeinflusst. Der Einfluss, der durch die Änderung des spezifischen Widerstandes hervorgerufen wird, kann durch das Betreiben der Spulen mittels Stromkonstanter kompensiert werden. Die Kupferleiter werden unter mechanischer Spannung auf den Spulenkörper gewickelt. Deshalb ist die thermische Ausdehnung der Spule im Wesentlichen durch die Ausdehnung des Spulenträgers bestimmt. Die Fläche der Spulen ändert sich bei Variation der Temperatur. Da das in einer Spule erzeugte Magnetfeld proportional zur Fläche der Spule ist, erniedrigt sich das bei gleichem konstanten Strom im Zentrum der Spule erzeugte Feld mit Erhöhung der Temperatur. Die Anlage „pumpt“.

Die obigen Aussagen zeigen deutlich, dass es für das Einhalten der angestrebten Genauigkeit notwendig ist,

- a. die Übertragungsfaktoren der einzelnen Spulen in Abhängigkeit der Temperatur durch direkte Messungen zu bestimmen und
- b. die Temperatur des Spulensystems zu überwachen.

Eine direkte Bestimmung der Übertragungsfaktoren durch Messungen ist möglich. Ein Verfahren hierfür wird im Abschnitt 2.4.6 vorgestellt.

Anzahl der Läufe	Toleranz in cm	Übertragungsfaktor $U$ -Achse in pT/mA			
		Minimal	Maximal	Mittelwert	Standard- abweichung
200	0.0			1676.61	
200	0.0001	1676.61	1676.61	1676.61	0.00
200	0.0005	1676.61	1676.61	1676.61	0.00
200	0.001	1676.60	1676.62	1676.61	0.00
200	0.002	1676.60	1676.62	1676.61	0.01
200	0.005	1676.57	1676.64	1676.61	0.01
200	0.01	1676.53	1676.67	1676.61	0.03
200	0.02	1676.46	1676.73	1676.61	0.05
200	0.05	1676.23	1676.90	1676.61	0.13
200	0.1	1675.85	1677.19	1676.61	0.25
200	0.2	1675.09	1677.76	1676.60	0.51
200	0.5	1672.81	1679.49	1676.59	1.27
200	1.0	1669.00	1682.35	1676.55	2.54
200	2.0	1661.35	1688.04	1676.41	5.08

Tabelle 2.2: Berechnete Übertragungsfaktoren im Zentrum des Spulensystems unter Variation der Nominalpositionen der Spulen

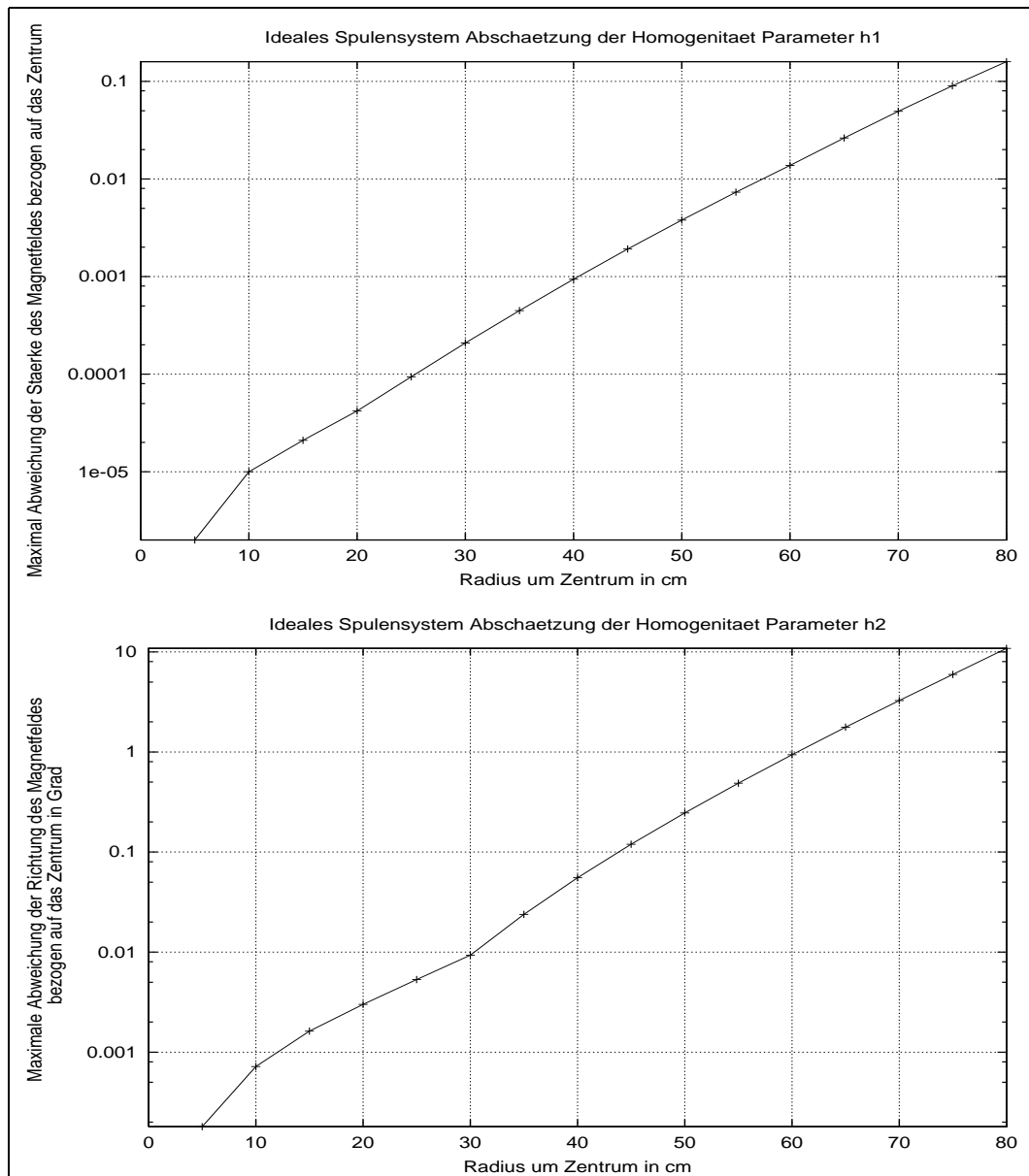


Abbildung 2.11: Homogenität der Magnetfelder im Inneren des als ideal angenommenen Braunkespulensystem in „Magnetsrode“



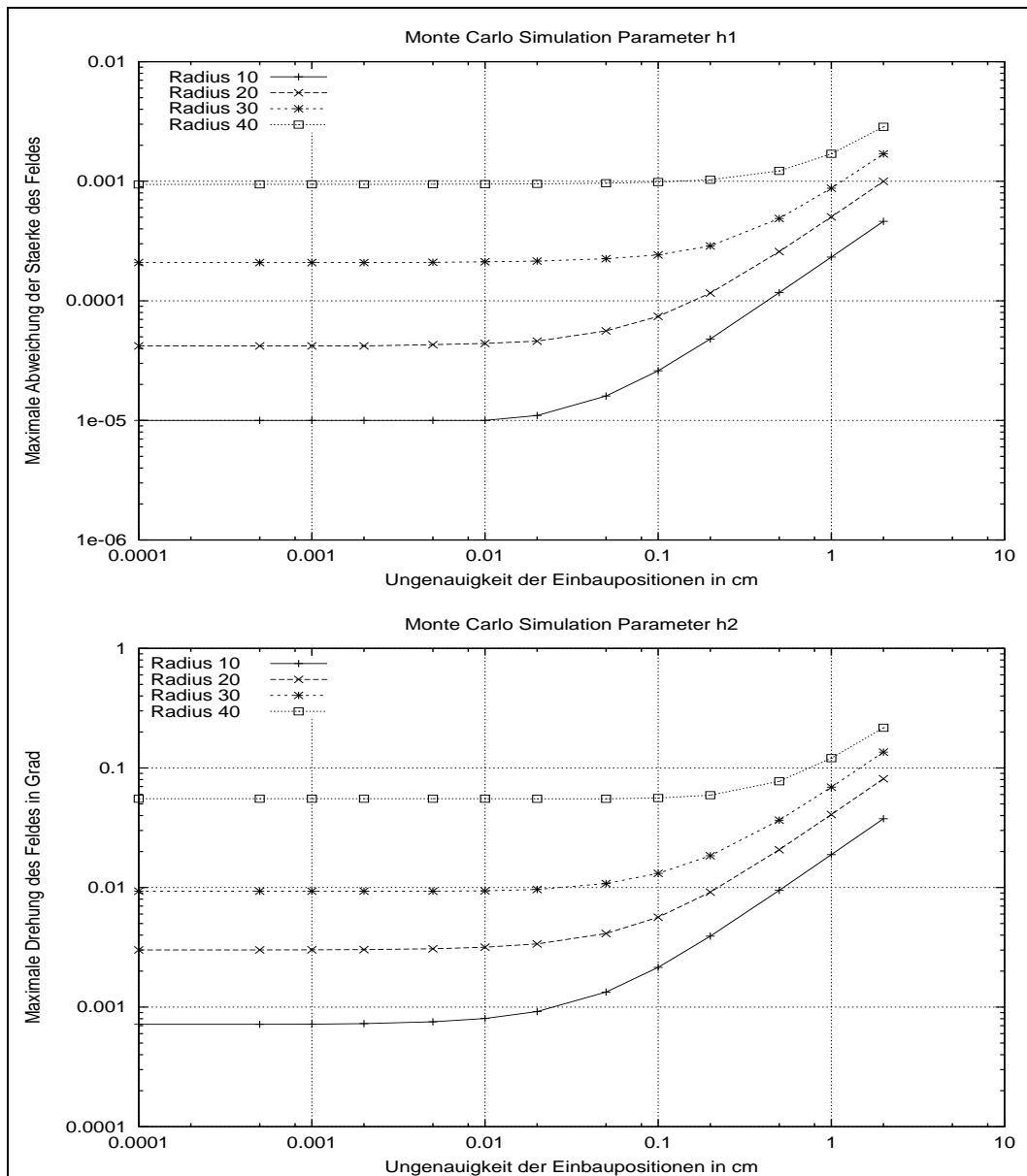


Abbildung 2.12: Der Einfluss von Fertigungstoleranzen auf die Homogenität der Magnetfelder im Inneren des Braunbekspulensystem in „Magnetsrode“

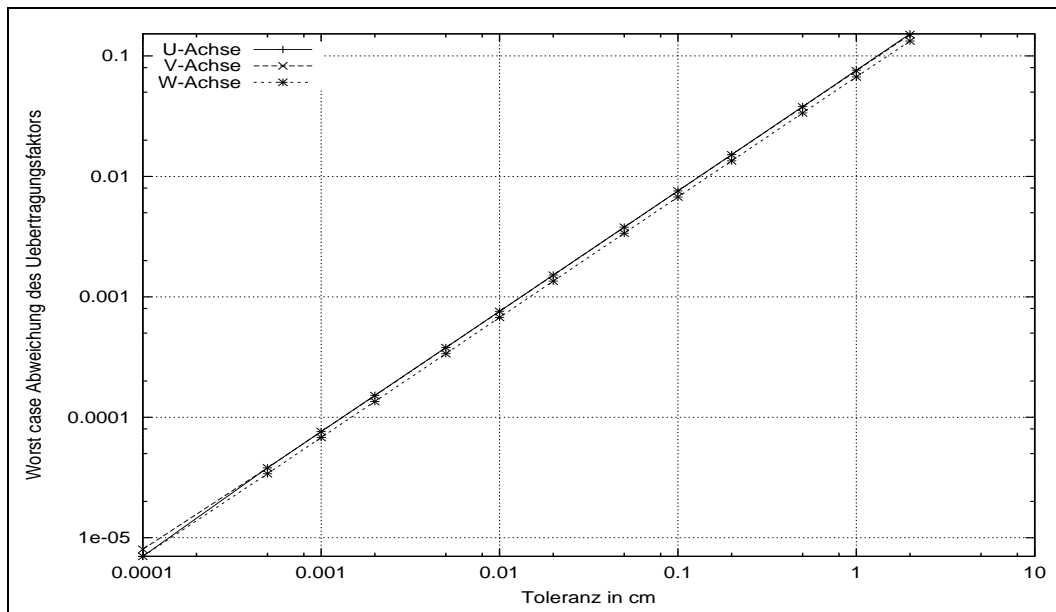


Abbildung 2.13: Maximal erwartete Änderung des Übertragungsfaktors bei der Änderung der Fertigungstoleranzen in „Magnetsrode“

### 2.4.5 Zusammenfassung möglicher Störgrößen

Aus den vorherigen Abschnitten ergeben sich die folgenden möglichen Störgrößen, die es zu berücksichtigen und zu minimieren gilt:

- zeitlich variables Erdmagnetfeld<sup>5</sup>
- ferromagnetisches Material in unmittelbarer Umgebung<sup>6</sup>
- mechanische Fehlstellungen der Spulen
- Temperatur im Laborsystem, damit auch
- anwesende Personen (Eintrag von Wärmeenergie)
- offene Türen (Wärmeeintrag durch Konvektion)
- mangelnde Stabilität der Ströme durch die Spulen

### 2.4.6 Modell zur Korrektur bekannter Störgrößen

Auf Grund der nichtidealen Bedingungen ergibt sich der folgende Ansatz für das am Ort  $\underline{p}$  in kartesischen Koordinaten erzeugte Magnetfeld:

$$\underline{B}_{Sp}(\underline{p}_{uL}, \underline{p}_{vL}, \underline{p}_{wL}) = \underline{A}_{Sp} \underline{E}_{SpT} \underline{E}_{SpP}(\underline{p}_{uL}, \underline{p}_{vL}, \underline{p}_{wL}) \underline{E}_{Sp0} (\underline{U}_{Kunst} - \underline{U}_{RMag}) +$$

<sup>5</sup>Gegenmaßnahme: dynamische Kompensation

<sup>6</sup>vermeidbar durch Kontrolle aller im Laborsystem verwendeten Gegenstände auf ihr magnetisches Verhalten

$$+\underline{b}_{\text{Erd}} + \underline{b}_{\text{Rest}}. \quad (2.20)$$

Mit

$$\underline{b}_{\text{Ref}} := \underline{A}_{\text{Sp}} \underline{E}_{\text{SpT}} \underline{E}_{\text{SpP}}(p_{\text{uL}}, p_{\text{vL}}, p_{\text{wL}}) \underline{E}_{\text{Sp0}} (\underline{U}_{\text{Kunst}} - \underline{U}_{\text{RMag}}) + \underline{b}_{\text{Erd}} \quad (2.21)$$

folgt

$$\underline{B}_{\text{Sp}}(p_{\text{uL}}, p_{\text{vL}}, p_{\text{wL}}) = \underline{b}_{\text{Ref}} + \underline{b}_{\text{Rest}}. \quad (2.22)$$

Dabei trägt die Korrekturgröße  $\underline{A}_{\text{Sp}}$  dem Sachverhalt der drei nicht orthogonal aufeinander stehenden Braunbekspulenkomponenten Rechnung. Der Übertragungsfaktor  $\underline{E}_{\text{Sp0}}$ , die temperaturabhängige Empfindlichkeit  $\underline{E}_{\text{SpT}}$  die vom geometrischen Ort innerhalb des Spulensystems abhängige Ortsempfindlichkeit  $\underline{E}_{\text{SpP}}$  und das magnetische Induktion  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  sind weitere Korrekturgrößen.  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  beschreibt jene Felder, die nach allen Korrekturen durch das Modell nicht erfasst werden. In den folgenden Abschnitten werden diese Koeffizienten ausführlich erläutert.

### Der Übertragungsfaktor

$\underline{E}_{\text{Sp0}}$  bezeichnet den Übertragungstensor. Er kann für jede Komponente durch einen skalaren Faktor angegeben werden, sofern die benötigten Ströme  $I$  mit einer ausreichenden Genauigkeit im U/I-Wandler produziert werden können und Wechsignale einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Übertragungsfunktion ausüben [Kertz et al. 1968, Lühr 1984].  $\underline{E}_{\text{Sp0}}$  wird im Wesentlichen durch den Verstärkungsfaktor des Operationsverstärkers im Rückkopplungszweig bestimmt. Einen weiteren Einfluss übt die Temperaturabhängigkeit des Shuntwiderstandes aus<sup>7</sup>. Mit der Annahme einer konstanten Temperatur innerhalb der Elektronik kann der Übertragungsfaktor für jede Komponente einzeln bestimmt werden. Hierzu wird ein absolut messendes Protonenmagnetometer verwendet. In „Magnetsrode“ ist der Verstärkungsfaktor so abgeglichen, dass einer Eingangsspannung von 1 Volt eine magnetische Induktion von nominal 10000 nT zugeordnet wird.  $e_{\text{Sp0u}}, e_{\text{Sp0v}}, e_{\text{Sp0w}}$  korrigieren die verbleibende Abweichung. Der Korrekturfaktor ist aber für jede Komponente  $\approx 1$ . Der Übertragungstensor  $\underline{E}_{\text{Sp0}}$  hat die Dimension von nT/V.

### Die Ortsempfindlichkeit

Die Stärke und Richtung des im Laborsystem durch die drei Braunbekspulensysteme erzeugten Magnetfeldes wird auf das Zentrum der Spulensysteme bezogen. Demgegenüber variiert das von den Spulensystemen erzeugte Magnetfeld oft beträchtlich in Stärke und Richtung außerhalb dieses Zentrums. Mit der Matrix  $\underline{E}_{\text{SpP}}$  wird diese Abhängigkeit des von dem Spulensystem erzeugten Magnetfeldes bezüglich der Geometrie der Spulen beschrieben. Sie ist im wesentlichen von dem mechanischen Aufbau der verwendeten Spulen abhängig. Mittels des Gesetzes von Biot–Savart kann das

<sup>7</sup>Deshalb werden in den Leistungsverstärkern in „Magnetsrode“ sehr leistungsstarke 1  $\Omega$ -Widerstände im Rückkopplungszweig verwendet, um eine Erwärmung, die mit einer Widerstandsänderung von 5 ppm pro K verbunden ist, zu vermeiden (siehe auch Abschnitt 2.4.3).

vom Spulensystem durch einen elektrischen Strom erzeugte Magnetfeld an einem geometrischen Aufpunkt  $p_{u_L, v_L, w_L}$  innerhalb und außerhalb des Spulensystems berechnet werden.

### Orthogonalität

Eine weitere Abhängigkeit des Braunbeksystems von den mechanischen Parametern ergibt sich durch die nicht orthogonale Stellung der drei Braunbekspulenachsen zueinander. Es entsteht eine Missweisung im magnetischem System, die aber durch  $\underline{\underline{A}}_{Sp}$  korrigiert werden kann. Die Autoren [Hertz/Lauxen 1993] schlagen zur Bestimmung der magnetischen Missweisung  $\underline{\underline{A}}_{Sp}$  eines Spulensystems ein Verfahren vor, dass auf Messungen der Totalintensität des Magnetfeldes durch ein Protonenmagnetometer basiert. Der Nachteil fehlender Komponentenmessungen wird durch eine geeignete Wahl der Testvektoren zur Bestimmung der Parameter  $\underline{b}_{Rest}$  und  $\underline{\underline{A}}_{Sp}$  kompensiert.

In dieser Arbeit wird das von [Hertz/Lauxen 1993] angegebene Verfahren erweitert, um von der Wahl der Testvektoren unabhängig zu werden und das Restfeld innerhalb der Anlage besser berücksichtigen zu können. In dem Modell

$$b_{Proton} = \sqrt{b_{f_{nu}}^2 + b_{f_{nv}}^2 + b_{f_{nw}}^2} \quad (2.23)$$

$$\underline{b}_{fn} = \underline{\underline{A}}_{Sp} \underline{\underline{E}}_{SpT} \underline{\underline{E}}_{SpP}(p_{u_L}, p_{v_L}, p_{w_L}) \underline{\underline{E}}_{Sp0} \underline{u}_{Kunst} + \underline{b}_{Rest} \quad (2.24)$$

wird der skalare Messwert des Protonenmagnetometers  $b_{Proton}$  aus der von den Spulen erzeugten magnetischen Induktion  $\underline{b}_{fn}$  abgeleitet. Die Matrix  $\underline{\underline{E}}_{Sp0}$  beinhaltet eine Korrektur der Empfindlichkeit der Spulen. Die Matrix  $\underline{\underline{A}}_{Sp}$  orthogonalisiert die Werte weiter. Bei der Matrix  $\underline{\underline{A}}_{Sp}$  handelt es sich um eine obere Dreiecksmatrix<sup>8</sup>.

Wird die Temperatur innerhalb des Spulensystems während der Messung konstant gehalten, dann wird  $\underline{\underline{E}}_{SpT}$  zur Einheitsmatrix. Steht das Magnetometer im Zentrum des Spulensystems, wird  $\underline{\underline{E}}_{SpP}(p_{u_L}, p_{v_L}, p_{w_L})$  ebenfalls zur Einheitsmatrix. Beide Parameter können durch Variation der Temperatur bzw. der Position des Protonenmagnetometers innerhalb der Anlage bestimmt werden. In Komponentenschreibweise ergibt sich für Gl.(2.24):

$$\begin{pmatrix} b_{f_{nu}} \\ b_{f_{nv}} \\ b_{f_{nw}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{Sp1} & a_{Sp2} & a_{Sp3} \\ 0 & a_{Sp4} & a_{Sp5} \\ 0 & 0 & a_{Sp6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{Sp0u} & 0 & 0 \\ 0 & e_{Sp0v} & 0 \\ 0 & 0 & e_{Sp0w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{fu} \\ u_{fv} \\ u_{fw} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{fu} \\ b_{fv} \\ b_{fw} \end{pmatrix}.$$

$\parallel$   
 $\underline{B}_{fn}$

$\parallel$   
 $\underline{\underline{A}}_{Sp}$

$\parallel$   
 $\underline{\underline{E}}_{Sp0}$

$\parallel$   
 $\underline{u}_{Kunst}$

$\parallel$   
 $\underline{b}_{Rest}$

(2.25)

Ausmultipliziert folgt damit

$$b_{f_{nu}} = a_{Sp1}e_{Sp0u}u_{fu} + a_{Sp2}e_{Sp0v}u_{fv} + a_{Sp3}e_{Sp0w}u_{fw} + b_{fu}, \quad (2.26)$$

$$b_{f_{nv}} = a_{Sp4}e_{Sp0v}u_{fv} + a_{Sp5}e_{Sp0w}u_{fw} + b_{fv}, \quad (2.27)$$

$$b_{f_{nw}} = a_{Sp6}e_{Sp0w}u_{fw} + b_{fw}, \quad (2.28)$$

$$b_{Proton} = \sqrt{b_{f_{nu}}^2 + b_{f_{nv}}^2 + b_{f_{nw}}^2}. \quad (2.29)$$

<sup>8</sup>Dieser Ansatz ist analog dem im Abschnitt 3.1 noch vorzustellenden Ansatz zur Bestimmung der Parameter eines Dreiaxssensors. Es werden an dieser Stelle die gleichen Annahmen wie im Abschnitt 3.1 getroffen

Messung	1	2	3	4
Datum	März 1998	24.04.1998	07.05.1998	07.05.1998
Uhrzeit		12:53	10:49	11:44
Restfeld $U$ in nT	4.65	-0.28	2.07	1.92
Restfeld $V$ in nT	-6.48	-4.53	-2.08	-2.42
Restfeld $W$ in nT	9.69	12.48	-1.14	-1.27
Schiefstellung UV Achse in ',"	0'26.9"	0'2.6"	0'10.5"	0'12.1"
Schiefstellung UW Achse in ',"	2' 3.3"	2' 1.1"	2' 1.4"	2' 1.1"
Schiefstellung VW Achse in ',"	0' 3.1"	0'27.4"	0'13.9"	0'13.1"
Empfindlichkeit U Achse	0.99998	0.99987	0.99988	0.99988
Empfindlichkeit V Achse	0.99989	0.99991	0.99994	0.99994
Empfindlichkeit W Achse	1.0002	0.99997	0.99994	0.99994

Tabelle 2.3: Aus Messungen ermittelte Parameter von „Magnetsrode“

Das so entstehende Gleichungssystem (2.26)–(2.29) ist in den zu bestimmenden Koeffizienten  $a_{spi}$ ,  $e_{sp0i}$ ,  $b_{ni}$  auf Grund der Betragsbildung nichtlinear und kann mit den in Kapitel 4.1 angegebenen Verfahren durch einen nichtlinearen Ausgleich gelöst werden. Für „Magnetsrode“ ergeben sich die in Tabelle 2.3 bestimmten Parameter.

Bei der Durchführung der Messungen bleibt zu beachten, dass der Feldgradient über der Messzelle des Protonenmagnetometers klein bleiben muss, da sonst das Messergebnis des Protonenmagnetometers verfälscht wird. Innerhalb des homogenen Bereiches des Spulensystems ist der Feldgradient klein (siehe oben). Ein Vergleich der Ergebnisse der Messungen mit den theoretisch ermittelten Werten zeigt eine Missweisung des Winkels zwischen der  $U$ - und  $W$ -Achse von etwa 2 Bogenminuten. Dieser Wert ist nicht konform mit den im Abschnitt 2.4.4 gemachten Abschätzungen. Hierbei sind die 4 Spulen der  $U$ -Achse gegen die vier Spulen der  $W$ -Achse um 2 Bogenminuten gedreht montiert<sup>9</sup>. Dabei sind die Auswirkungen auf die Homogenität des erzeugten Magnetfeldes, bezogen auf die Genauigkeitsanforderung von besser als  $1 \cdot 10^{-4}$ , gerade noch tolerabel. Desweiteren zeigt sich, dass die einzelnen Übertragungsfaktoren der Achsen im Laufe der Zeit variieren, bedingt durch eine Langzeitdrift der Verstärkelektronik und überlagert mit der Änderung der Temperatur der Spulen und der Elektronik. Desweiteren ändern sich die Restfelder innerhalb des Spulensystems. Sie sind zum Beispiel auch abhängig vom Messaufbau des untersuchten Magnetometers, da die Nähe von ferromagnetischem Material einen direkten Einfluss auf sie hat. Als Quintessenz dieser Ausführungen ergibt sich die Notwendigkeit einer Überprüfung des Laborsystems vor den Messungen. Ferner müssen die in den weiteren Kapiteln entwickelten Verfahren, insbesondere die Variation der magnetischen Restfelder im Spulensystem, berücksichtigt werden.

### Temperaturabhängigkeit

Die Stromstärke  $I$  ändert sich bei Variation der Temperatur innerhalb des Spulensystems nicht, da die Spulen durch Stromkonstanter betrieben werden. Hierdurch

<sup>9</sup>Dies entspricht bei der Montage einem Versatz von weniger als 1 mm.

wird die Variation des spezifischen Widerstandes der Kupferleiter mit der Temperatur kompensiert. Trotzdem ist ein Einfluss der Variation der Temperatur  $\underline{E}_{\text{SpT}}$  auf das im Inneren erzeugte Kunstfeld beobachtbar. Diese wird durch die mechanische Ausdehnung des Spulensystems mit der Temperatur erklärt.

$\underline{E}_{\text{SpT}}$  ist eine Matrix, die durch das Ersetzen der linearen Koeffizienten  $e_{\text{SpTu}}$ ,  $e_{\text{SpTv}}$ ,  $e_{\text{SpTw}}$  durch eine lineare Funktion entsteht. Damit ergibt sich

$$e_{\text{SpTu}} := e_{\text{SpT0u}} + e_{\text{SpT1u}} T, \quad (2.30)$$

$$e_{\text{SpTv}} := e_{\text{SpT0v}} + e_{\text{SpT1v}} T, \quad (2.31)$$

$$e_{\text{SpTw}} := e_{\text{SpT0w}} + e_{\text{SpT1w}} T. \quad (2.32)$$

Dieser Ansatz rechtfertigt sich durch die obige Überlegung und die durchgeführten Messungen. Wird die Temperatur der Anlage bzw. die Temperatur der einzelnen Spulenkörper gemessen, so kann der Einfluss der Temperatur auf das Feld im Inneren der Spule unter Ermittlung einer mittleren Temperatur korrigiert werden. Bei konstantem Temperaturverlauf wirkt dieser Korrekturfaktor nach außen wie eine Änderung der Empfindlichkeit der einzelnen Spulen selbst.

Der Einfluss der Temperaturunterschiede von max. 2 K auf das Innenfeld, der in der Anlage durch Konvektion der Heizungsluft bzw. durch eine horizontale Temperaturschichtung entsteht, wird vernachlässigt. Typischerweise verhalten sich die Temperaturgradienten innerhalb der Anlage invariant gegen eine Temperaturänderung von wenigen Grad Celsius. Im praktischen Betrieb muss darauf geachtet werden, dass es zu keinem unkontrollierten Wärmeeintrag kommt. In Betracht kommen hierfür als Quellen

- Luftzufuhr durch Konvektion (z.B. offene Türen)
- elektrisches Licht
- anwesende Personen

### Restfeld

$\underline{b}_{\text{Rest}}$  erfasst all jene Effekte, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Dabei sind zu nennen:

- **Stationärer Feldgradient in der Anlage**  
Bisher wird ein möglicher über dem Laborsystem herrschender statischer Magnetfeldgradient nicht berücksichtigt. Da der Feldgradient, der beim Bau der Anlage untersucht wurde, klein war und bei späteren Überprüfungen sich keine wesentliche Änderung ergeben hat, wird er über dem Innenraum der Spule vernachlässigt.
- **Variation des Magnetfeldes im Laborsystem durch eine unzureichende Kompensation des Erdmagnetfeldes**  
Ist das Referenzmagnetometer nicht exakt parallel zu dem Spulensystem in 50 m

Entfernung ausgerichtet, bleibt ein Teil des zu kompensierenden Erdmagnetfeldes im Spulensystem unkompensiert. Damit prägen sich Erdmagnetfeldvariationen auf das Magnetfeld in der Anlage durch.

- **Temporäre Einstrahlung durch elektromagnetische Felder und „vagabundierende“ Ströme**

Unter bestimmten Umweltbedingungen wirkt der Kreis aus Spule und Verstärker wie eine Antenne. Dann entstehen in der Anlage zusätzliche zeitlich variable Magnetfelder, die vom System selbst nicht erfasst und kompensiert werden können. In diesem Zusammenhang ist auch ein weiterer magnetischer Effekt zu nennen. Er entsteht durch „vagabundierende“ Ströme, die im Erdreich durch zeitlich variable Ströme in der Ionosphäre oder durch technische Einflüsse wie zum Beispiel die Stromzuleitungen der Eisenbahn induziert werden.

- **Anwesenheit technischer Magnetfeldquellen (z.B. Autos)**

Bei Messungen spielt die magnetische Sauberkeit der Anlage eine wesentliche Rolle. Alles ferromagnetische Material in der Nähe des Spulensystems erzeugt ein zusätzliches Magnetfeld. Wird das Material zusätzlich auch bewegt, kommt es zu zeitlichen Änderungen des Feldes und des dadurch erzeugten Gradienten in der Spule. Deshalb ist eine Kontrolle aller Materialien dringend erforderlich, die in die Magnetfeldlabore und in ihre Nähe gebracht werden.

Alle obengenannten Effekte lassen sich nicht mit dem in Gl.(2.20) vorgestellten Modell kompensieren. Sie lassen sich mittels eines zusätzlichen Stationsmagnetometers in der Nähe des Spulensystems überwachen. Werden an diesem Magnetometer Änderungen registriert, so hat sich typischerweise  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  verändert. Da diese Effekte eher selten auftreten oder auch vermeidbar sind, ist ihr Einfluss zu vernachlässigen. Sollten signifikante Änderungen in  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  während einer Messung beobachtet werden, so muss sie wiederholt werden.

## 2.5 Automatisierte Messwerterfassung

Mit der Erfassung der Parameter von Laborsystem und Prüfling werden bei einer Kalibrierung mehrere Ziele verfolgt. Zum einen dienen sie der Sicherung der aufgenommenen Daten, zum anderen der Synchronisation der aus verschiedenen Quellen kommenden Daten. Nach der Synchronisation können aus den unterschiedlichen Datenströmen durch eine manuelle oder datentechnische Verarbeitung Messvektoren erzeugt werden. Diese Messvektoren bilden die Grundlage, auf der eine weitere Analyse und Auswertung der Daten typischerweise erfolgt.

Die Synchronisation der Daten kann durch verschiedene Methoden erfolgen. Im Falle einer manuellen Verarbeitung erfolgt sie typischerweise mittels einer Tabelle in einem Laborjournal. Dies ist aber eher selten der Fall. Sehr häufig erzeugt auch das zu untersuchende Magnetometer einen digitalen Datenstrom, sodass bei einer vergleichsweise einfachen Messung, wie der im Abschnitt 2.2 vorgestellten, bereits etwa 230000 Vektoren<sup>10</sup> in etwa einer Stunde durch das Magnetometer produziert werden.

<sup>10</sup>(Digitalisierungsrate: 64 Hz; Dauer: 3600 sec)

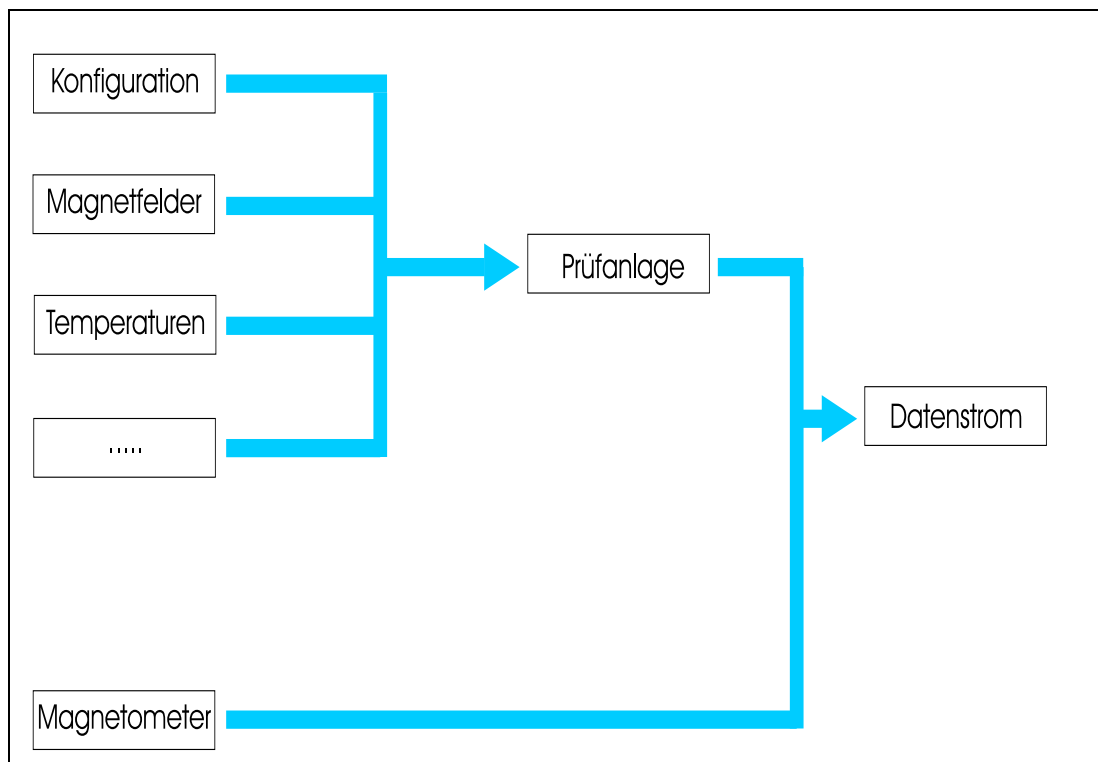


Abbildung 2.14: Schematischer Aufbau des Datenflusses zur automatischen Erfassung von Datenvektoren

Damit eine Erfassung der Datenvektoren automatisiert erfolgen kann, ist neben einer geeigneten Ansteuerung des Laborsystems eine automatisierte Registrierung aller relevanten Daten zwingend notwendig. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um

- alle als relevant erkannten Umweltparameter<sup>11</sup>,
- die Messwerte des Prüflings,
- die Konfiguration des Laborsystems.

Abbildung 2.14 illustriert die Datenströme der automatisierten Registrierung. Jeder einzelne Datenstrom kann natürlich für sich alleine aufgezeichnet werden. In der Praxis erweist sich allerdings die Synchronisation der verschiedenen Datenströme als ausgesprochen aufwendig und mühsam. Deshalb werden die Datenströme der unterschiedlichen Quellen in einer Datei, der sogenannten **Complete Calibration Data Datei (CCD)**, zusammengeführt und gesammelt. Hierdurch wird neben der erleichterten Zuordnung der Datenströme zueinander auch noch die Archivierung der Rohdaten vereinfacht. Es muss lediglich eine einzige Datei gesichert werden, um eine gesamte Messung zu archivieren.

Im Idealfall sind die Datenströme der einzelnen Komponenten synchronisiert, sodass

<sup>11</sup>wie zum Beispiel das Magnetfeld im Spulensystem, Temperatur des zu untersuchenden Instruments, Erdmagnetfeldschwankungen, ...



ihre spätere Zuordnung durch ein einfaches sequentielles Auslesen der Daten erfolgen kann. In Wirklichkeit ist dies leider häufig nicht der Fall. Um aus den Rohdaten Datenvektoren und später Kalibriervektoren gewinnen zu können, ist eine weitere schrittweise Aufbereitung der Daten aus der CCD-Datei notwendig. Abbildung 2.15 illustriert den Weg, den die Menge der Rohdatenvektoren nimmt, bis aus ihnen eine Zahl von Kalibriervektoren wird. Hier ist unter A) das zu untersuchende Messsignal, bestehend aus den Rohdatenvektoren, aufgetragen. Es beinhaltet alle Fehler, die bei der Messung aufgetreten sind, sodass theoretisch jeder Messvektor ein Messausreißer sein kann.

B) zeigt die dem Messsignal zugeordnete Zeitachse.  $t_1 - t_6$  markieren die Zeitpunkte, an denen im Laborsystem Felder geschaltet werden, sich also die Feldkonfiguration ändert. Jeder dieser Zeitpunkte markiert damit den Anfang eines neuen Kalibrier-schrittes. Ferner wird angenommen, dass in den Bereichen, die grau unterlegt sind, das Messsignal aufgrund des transienten Einschwingverhaltens des Laborsystems gestört und damit nicht verwendbar ist. Die vom Instrument digitalisierten Daten werden in Blöcken, den sogenannten Datenframes, gesammelt und in der CCD-Datei gespeichert. Aus anderen Quellen D) und E) werden weitere Daten des Spulensystems und Temperaturen an verschiedenen Orten des Spulensystems gesammelt und ebenfalls in der gleichen CCD-Datei gesichert. Damit entsteht der unter F) angedeutete Datenstrom der CCD-Datei.

G) symbolisiert die extrahierten Kalibriervektoren, die die Eingangsdaten für die Kalibrierung bilden. Bei der Entwicklung und der Umsetzung eines Konzeptes, welches die Daten aus F) in G) überführt, ist auf Grund der großen Datenmengen eine Vorgehensweise wünschenswert, die einerseits den Auswertungsablauf weitgehend automatisiert, andererseits aber jederzeit eine Kontrolle der durchgeführten Schritte ermöglicht.

## 2 Aufbau und Durchführung von Kalibriermessungen

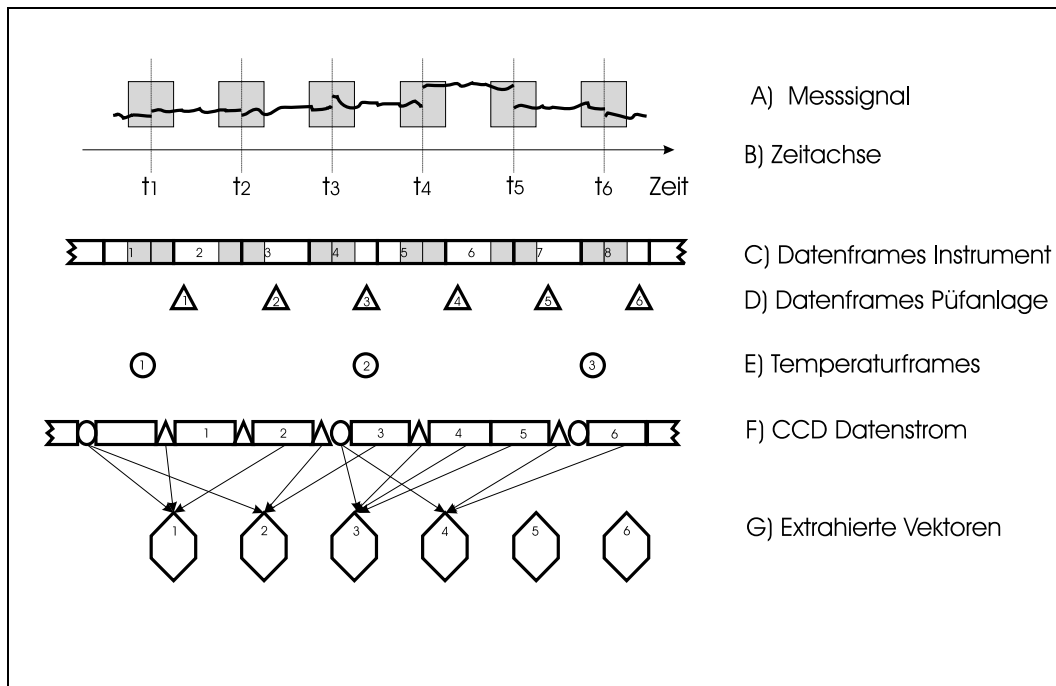


Abbildung 2.15: Gewinnung von Kalibriervektoren (schematisch)

Folgender schematischer Ablaufplan für eine Auswertung ist durchführbar und wird in den weiteren Abschnitten näher erläutert:

**Schritt 1** Zunächst werden „geeignete“ Bereiche in der CCD-Datei markiert.

**Schritt 2** Den ausgewählten Bereichen werden die entsprechenden Kalibrierschritte der Anlage zugeordnet.

**Schritt 3** Transformation der Vektoren des ausgewählten Bereiches in ein Koordinatensystem

**Schritt 4** Die ausgewählten Bereiche werden statistisch ausgewertet.

**Schritt 5** Die Ergebnisse der statistischen Auswertung werden in einem Datensatz zusammengefasst und in einer Datenbank gespeichert.

**Schritt 6** Durch die Auswahl geeigneter Datensätze wird aus der Datenbank ein Satz geeigneter Kalibriervektoren extrahiert.

### 2.5.1 Schritt 1: Markierung geeigneter Bereiche in der CCD-Datei

Schritt 1 dient

- der Reduktion der Messdaten auf die tatsächlich interessierenden Bereiche. (In Abbildung 2.15 A) unmarkierte Bereiche),
- der Zuordnung der in Abbildung 2.15 unter D) und E) genannten Datenframes zu den Instrumentendaten,
- der statistischen Auswertung der in Abbildung 2.15 A) unmarkierten Bereiche.

Die Reduktion der Messdaten auf die tatsächlich interessierenden Bereiche geht davon aus, dass alle Umweltbedingungen stabil und die Abtastrate des Instruments ungefähr bekannt ist. Eine signifikante Änderung der Statistik der Messvektoren wird nur an solchen Stellen auftreten, an denen ein neues Feld in der Anlage geschaltet wird ( $t_1, \dots, t_6$  in Abbildung 2.15). Abbildung 2.16 oben zeigt einen Ausschnitt von Rohdaten, auf die die Reduktion angewendet werden soll. Ein neues Feld wird hier an 4 Stellen geschaltet (zwischen Vektor 6100–6200, 8800–8900, 11600–11700 und 14300–14400). Die interessierenden Bereiche liegen etwa zwischen 5100–6100, 7800–8800, 10600–11600 und 13300–14300. Alle anderen Bereiche sind, wie aus Vorinformation bekannt ist, nicht verwendbar (Störungen durch andere Messgeräte etc.).

Das menschliche Auge erkennt die interessierenden Bereiche mit einem Blick. Leider erweist es sich aber als recht aufwendig, diesen „Blick“ einem Computer beizubringen. Folgender Algorithmus wird hierzu verwendet:

- Definition Sprungerkennung und sie auf „aktiv“ setzen,
- Definition eines Ringbuffers, in dem ein kurzes Intervall Messdaten gespeichert wird (Kurzzeitbuffer),  
Definition eines Ringbuffers, in dem ein langes Intervall Messdaten gespeichert wird (Langzeitbuffer),
- Anwendung eines Vorhersagefilters z.B. aus [Press et al. 1994] sowohl auf den Kurzzeitbuffer, als auch auf den Langzeitbuffer und Berechnung des Erwartungswertes  $e$ , jedesmal, bevor ein neuer Messwert  $m_{\text{neu}}$  in die Buffer eingefüllt wird,
- Berechnung des Vorhersagefehlers  $f$  für Kurzzeitbuffer und Langzeitbuffer durch  $f_{\text{kurz}} = e_{\text{kurz}} - m_{\text{neu}}$  und  $f_{\text{lang}} = e_{\text{lang}} - m_{\text{neu}}$ ,
- Berechnung des Quotienten  $Q = f_{\text{kurz}} / f_{\text{lang}}$ ,
- Definition von 2 Schwellwerten für  $Q$ :
  - Detektions-Schwellwert:  
Falls  $Q$  größer als dieser Wert und die Sprungerkennung aktiv ist, wird ein Sprung erkannt und die Sprungerkennung auf „passiv“ gesetzt.

## 2 Aufbau und Durchführung von Kalibriermessungen

- Aktivierungs-Schwellwert:  
Falls  $Q$  kleiner als dieser Schwellwert ist, wird die Sprungerkennung „aktiv“ gesetzt.
- Bei erkanntem Sprung, Berechnung des interessierenden Intervalls und Speicherung des Start- und Endvektors dieses Bereiches (im folgendem Rohdatenblock genannt).

Abbildung 2.16 Mitte zeigt das Ergebnis nach Anwendung des Algorithmuses auf die Daten aus Abbildung 2.16 Oben<sup>12</sup>. Wird ein Detektions-Schwellwert von 2.0 und ein Aktivierungs-Schwellwert von 1.3 gesetzt, so werden exakt 4 Sprünge erkannt und können für die weitere Verarbeitung separiert werden.

Da alle Rohdatenvektoren fehlerbehaftet sind, kann nicht garantiert werden, dass alle Kalibrierschritte nur jeweils einmal detektiert werden. Das hier angegebene Verfahren setzt zudem einen Zugriff auf jeden einzelnen Vektor innerhalb der Datenframes zwingend voraus.

---

<sup>12</sup>Hier beträgt die Länge des Kurzzeitbuffers 50 Vektoren, die Länge des Langzeitbuffers 300 Vektoren.

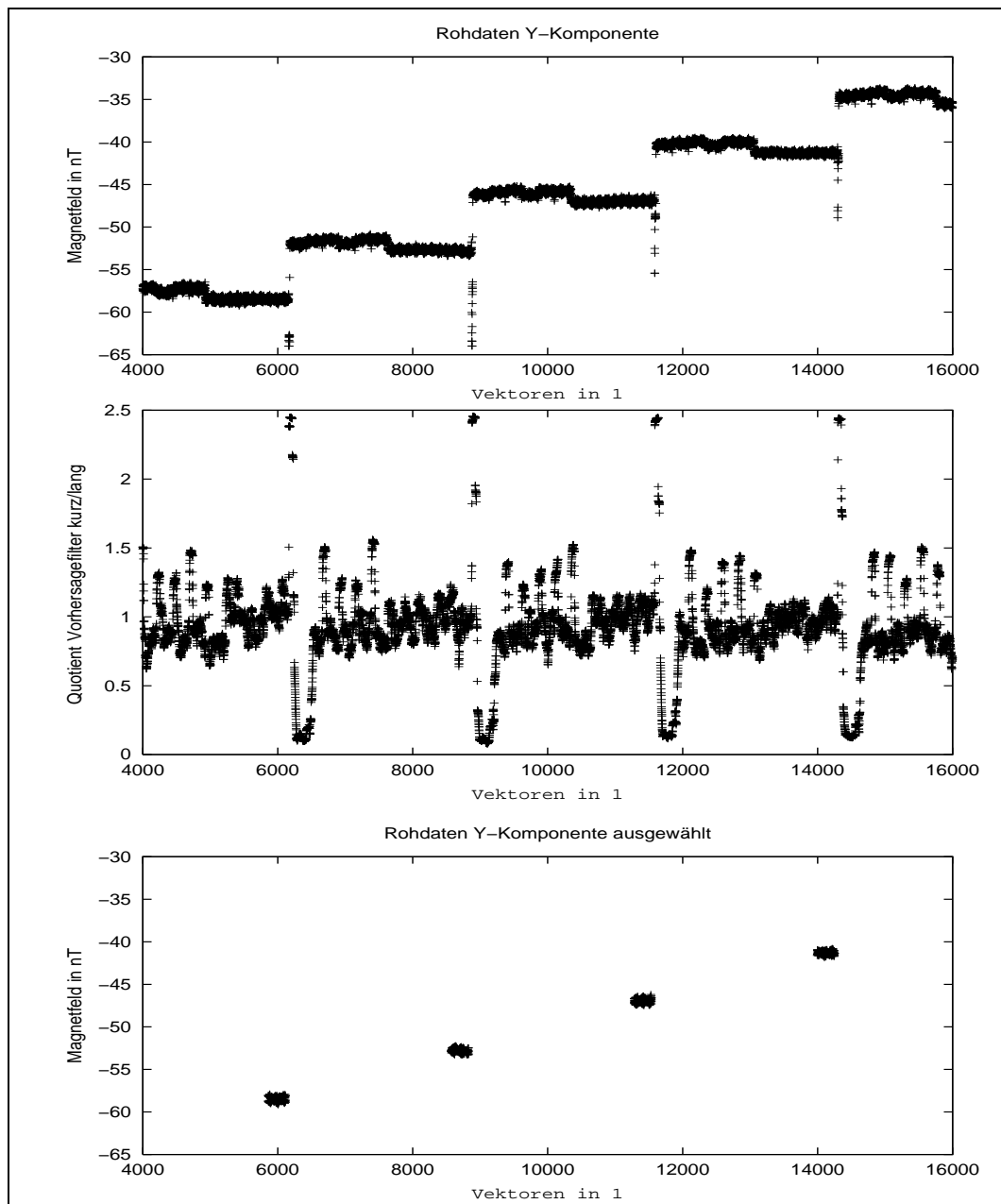


Abbildung 2.16: Oben: Messdaten einer Komponente; Mitte: Quotient der Vorhersagefehler; unten: Ausgewählte Bereiche

### 2.5.2 Schritt 2: Zuordnung der ausgewählten Bereiche zu Kalibrierschritten

Da der Datenstrom des Instruments und der Anlage sich zwar innerhalb der gleichen Datei befindet, aber als zwei asynchron mit einer unterschiedlichen Datenrate aufgezeichnete Prozesse aufgefasst werden müssen, besteht der folgende Schritt in der Zuordnung der entsprechenden Daten aus C) und D) zu jedem extrahierten Rohdatenblock.

Dabei kann von folgenden Voraussetzungen ausgegangen werden:

- Da die Generierung der Felder von einem PC aus gesteuert wird, können die Zeitmarkierungen aller vom Spulensystem erzeugten Datenblöcke auf  $\pm 1$  Sekunde angegeben werden.
- Innerhalb eines jeden Kalibrierschrittes wird zunächst die nominale Feldkonfiguration angelegt und dabei der FLD-Frame (Sollparameter) erzeugt. Dann werden nach einer „Einschwingzeit“ von einigen Sekunden die Sollparameter nachgemessen und als Istparameter in dem sogenannten SOLARTRON-Frame und PREMA-Frame gespeichert. Damit folgt jedem FLD-Frame der dazugehörige SOLARTRON- und PREMA-Frame. Jeder Kalibrierschritt kann so auf Seiten der Anlage aus der Kenntnis der Lage des ihm zugeordneten FLD-Frames rekonstruiert werden.
- Die Temperatur innerhalb der Anlage wird etwa alle drei Minuten einmal gemessen und als TEMP-Datenblock gespeichert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Temperatur innerhalb der Anlage nur sehr langsam variiert.
- Die zeitliche Zuordnung der Rohdatenblöcke erfolgt asynchron zu den vom Laborsystem erzeugten Datenframes. Im Extremfall entsteht so bei der Speicherung der Daten ein zeitlicher Versatz zwischen den Rohdatenframes und den ihnen zugeordneten, vom Laborsystem erzeugten Datenframes von mehreren Kalibrierschritten.

Der folgende Algorithmus kann zur Zuordnung der vom Spulensystem erzeugten Datenblöcke zu den Rohdatenblöcken angegeben werden:

- Bestimmung der Position des Rohdatenblocks innerhalb der CCD-Datei,
- Definition des Bereiches von Kalibrierschritten, die bezogen auf die Position des Rohdatenblocks untersucht werden sollen, z.B. Untersuchung von 5 Kalibrierschritten, die vor der Position des Rohdatenblocks in der CCD-Datei gespeichert wurden und 2 Kalibrierschritten, die nach der Position des Rohdatenblocks in der CCD-Datei gespeichert wurden,
- Normierung und statistische Auswertung des Rohdatenblocks unter Berücksichtigung der in den jeweiligen Kalibrierschritten verwendeten Eingabeparameter (siehe auch Schritt 3 und Schritt 4),
- Auswahl des bestpassenden Eintrags anhand des Vergleichs der statistischen Parameter mit den Eingangsgrößen der ausgewählten Kalibrierschritte.

Damit die Zuordnung der Kalibrierschritte eindeutig wird, ist darauf zu achten, dass sich benachbarte Kalibrierschritte signifikant voneinander unterscheiden. Relevante Merkmale sind hierbei z.B.

- Amplitude und Richtung angelegter DC-Felder,
- Frequenz angelegter AC-Felder,
- Amplitude angelegter AC-Felder.

### 2.5.3 Schritt 3: Normierung der Vektoren

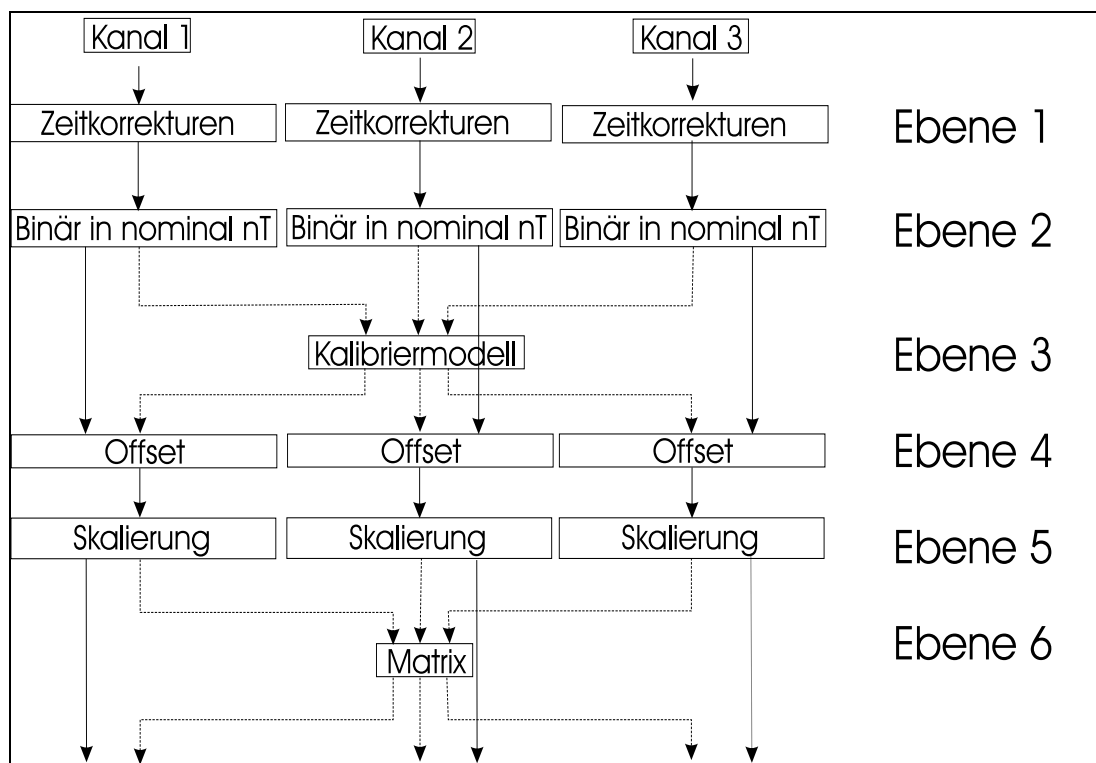


Abbildung 2.17: Flussdiagramm möglicher Operationen zur Normierung der Vektoren eines Rohdatenblocks

Eine Normierung der Vektoren des Rohdatenframes erfolgt, weil nur so die Eingangsdaten verschiedener Prüflinge mit den Daten des Laborsystems vergleichbar gemacht werden können. Abbildung 2.17 zeigt in einem Flussdiagramm alle realisierten Operationen zur Normierung der Rohdatenvektoren. Alle Operationen sind optional, d.h. sie werden nur angewendet, wenn es notwendig ist; so lässt sich die größtmögliche Flexibilität bei der Verarbeitung der Daten erreichen.

Folgt man dem Flussdiagramm, so können die normalerweise als binäre Datenworte abgespeicherten Vektoren zunächst in nominale „nT“ umgewandelt werden (Ebene 1 und Ebene 2). Mittels einer weiteren Korrektur kann ein Kalibriermodell auf die Vektoren angewendet werden (Ebene 3). Wird diese Korrektur angewendet, so hat sie

zur Folge, dass die drei unterschiedlichen Datenkanäle nicht mehr unabhängig voneinander sind. Über das Instrumentenmodell entsteht eine Kopplung der drei Kanäle untereinander.

Es folgt der Korrekturschritt (Ebene 4), der mögliche Offsets für jeden Kanal korrigiert. Ebene 5 lässt eine Korrektur der Empfindlichkeit zu. In einem letzten Korrekturschritt (Ebene 6) werden die drei Kanäle über eine Matrix miteinander verknüpft. Wird diese Ebene verwendet, so entsteht über die Matrix eine Kopplung der drei Kanäle untereinander. Natürlich können alle Ebenen in einer einzigen Transformationsmatrix erfasst werden. Die hier gewählte Aufteilung erfolgt, weil so einzelne Parameter, die durch Messungen bestimmt werden, nicht durch eine globale Matrix verdeckt werden und somit leichter modifiziert werden können. Durch Anwendung der Operationen zur Normierung der Vektoren eines Rohdatenblocks ist es möglich, die Rohdaten verschiedener Magnetometer in das Koordinatensystem des Laborsystems umzurechnen und damit für die Zuordnung aus Schritt 2 vergleichbar zu machen.

### 2.5.4 Schritt 4: Statistische Auswertung

Nach der Zuordnung werden die so extrahierten Daten in einer Datenbank gespeichert. Jeder dieser Datensätze wird im folgenden Messvektor genannt. Ein Messvektor enthält die folgenden Informationen:

- Berechneter Gleichfeldwert des Instruments,
- Statistische Parameter zur Bewertung der Gleichfeldwerte,
- Korrigierter Gleichfeldwert der Anlage,
- Temperaturen innerhalb des Laborsystems,
- Erdmagnetfeld,
- Zuordnung des Datensatzes in der CCD Datei.

Alle weiteren Operationen werden auf den Datensätzen der Datenbank vorgenommen. Die Datensätze (Messvektoren) selbst bleiben dabei aber immer intakt, d.h. einzelne Elemente innerhalb der Messvektoren werden nicht manipuliert.

### 2.5.5 Schritt 5: Datensatz schreiben

Die statistische Auswertung des Rohdatenblocks dient zum einen der Reduktion der Daten auf die signifikante Information, zum anderen hilft sie, Messausreißer zu detektieren und eventuell auch zu eliminieren, Rauschquellen zu finden sowie die den Daten zu Grunde liegende Statistik abzuschätzen. Dazu werden bei DC-Feldkonfigurationen

- Mittelwert (entspricht dem DC-Feldwert),
- Standardabweichung,



- Minimaler und maximaler Feldwert,
- Zahl der verwendeten Werte

bestimmt. Bei AC-Feldkonfigurationen, in denen dem DC-Signal 1–3 monofrequente Sinusschwingungen bekannter Frequenz und Amplitude überlagert sind, werden die Parameter

- DC-Feldwert,
- Phase des Signals,
- Amplitude,
- mittlerer Fehler der Anpassung,
- Standardabweichung des mittleren Fehler der Anpassung,
- Minimaler und maximaler Fehler der Anpassung,
- Zahl der verwendeten Werte

bestimmt. Messausreißer können durch den folgenden Algorithmus eliminiert werden:

- Bestimmung der statistischen Parameter des Rohdatenblocks,
- Markierung aller Werte als ungültig, deren Fehler bei der Anpassung größer als die dreifache Standardabweichung des mittleren Fehlers der Anpassung ist,
- erneute Bestimmung der statistischen Parameter des modifizierten Rohdatenblocks,
- Markierung aller Werte als ungültig, deren Fehler bei der Anpassung größer als die zweifache Standardabweichung des mittleren Fehlers der Anpassung ist,
- erneute Bestimmung der statistischen Parameter des modifizierten Rohdatenblocks,
- Markierung aller Werte als ungültig, deren Fehler bei der Anpassung größer als die Standardabweichung des mittleren Fehlers der Anpassung ist,
- erneute Bestimmung der statistischen Parameter des modifizierten Rohdatenblocks.

### 2.5.6 Schritt 6: Auswahl der Kalibriervektoren

Alle unter Schritt 5 gesammelten Daten, werden nach den Kriterien

- kleine Standardabweichung des mittleren Fehlers der Anpassung
- große Zahl der verwendeten Werte

untersucht. Jene Datensätze, die eines oder mehrere Kriterien nicht erfüllen, werden nicht weiter verwendet. Ebenso wird für jeden Kalibrierschritt maximal ein Datensatz verwendet.

## 3 Verfahren und Auswertetechniken

Im folgenden Kapitel werden Auswertetechniken der im vorherigen Kapitel gewonnenen Kalibriervektoren vorgestellt. Hierfür wird ein zunächst lineares Kalibriermodell (K-Modell) für einen Einzelsensor und für einen Dreiachssensor eingeführt und diskutiert. Weiterhin wird die Auswahl geeigneter Testvektoren einer Kalibrierung diskutiert. Hierbei spielen auch Faktoren wie die Temperatur der zu untersuchenden Sensoren und der Testaufbau eine wichtige Rolle. Am Ende dieser Diskussion steht die Vorstellung eines standardisierten Auswerteverfahrens einer Kalibriermessung, das an einem Beispiel vorgeführt wird.

### 3.1 Das lineare Kalibriermodell (K-Modell)

Das Kalibriermodell (K-Modell) kann zur Bestimmung der Lage eines Sensors in Bezug auf das Laborsystem und seiner Empfindlichkeit angewendet werden. Das K-Modell geht von einer linearen Abbildung der magnetischen Induktion des Laborsystems auf den Sensor aus.

In der Abbildung 3.1 ist die Idee des K-Modells mittels geometrischer Betrachtungen verdeutlicht. Hierzu wird angenommen, dass zum Beispiel im Laborsystem ein Magnetfeld in Richtung der  $U$ -Achse erzeugt wird. Die Länge des Vektors symbolisiert hierbei die Stärke des Feldes. Ein Sensor  $S$  misst die magnetische Induktion in Richtung des gestrichelten Pfeils. Er „sieht“ nur den Teil der magnetischen Induktion in  $U$ -Richtung, der auf die Richtung des  $S$ -Sensors projiziert wird. Dieser Anteil wird im Idealfall in der Elektronik des Magnetometers linear verstärkt. Damit ergibt sich am Ausgang des Magnetometers im  $X$ -Kanal

$$b_{\text{Instr},x} = e_1 \cos(\angle[S, U]) b_u. \quad (3.1)$$

Nimmt man ferner an, dass sich die magnetische Induktion aus Richtung der drei Achsen des Laborsystems superpositioniert, so ergibt sich am Ausgang des Magnetometers:

$$b_{\text{Instr},x} = e_1 \cos(\angle[S, U]) b_u + e_1 \cos(\angle[S, V]) b_v + e_1 \cos(\angle[S, W]) b_w \quad (3.2)$$

$$= e_1 (\cos(\angle[S, U]) b_u + \cos(\angle[S, V]) b_v + \cos(\angle[S, W]) b_w). \quad (3.3)$$

Wird der Sensor während der Messung nicht bewegt, folgt ferner die Konstanz der Ausdrücke  $\cos(\angle[S, U])$ ,  $\cos(\angle[S, V])$  und  $\cos(\angle[S, W])$ . Damit lässt sich die Gl.(3.2) mittels Koeffizientenvergleich in eine lineare Abbildung der Form

$$b_{\text{Instr},x} = l_1 b_u + l_2 b_v + l_3 b_w \quad (3.4)$$

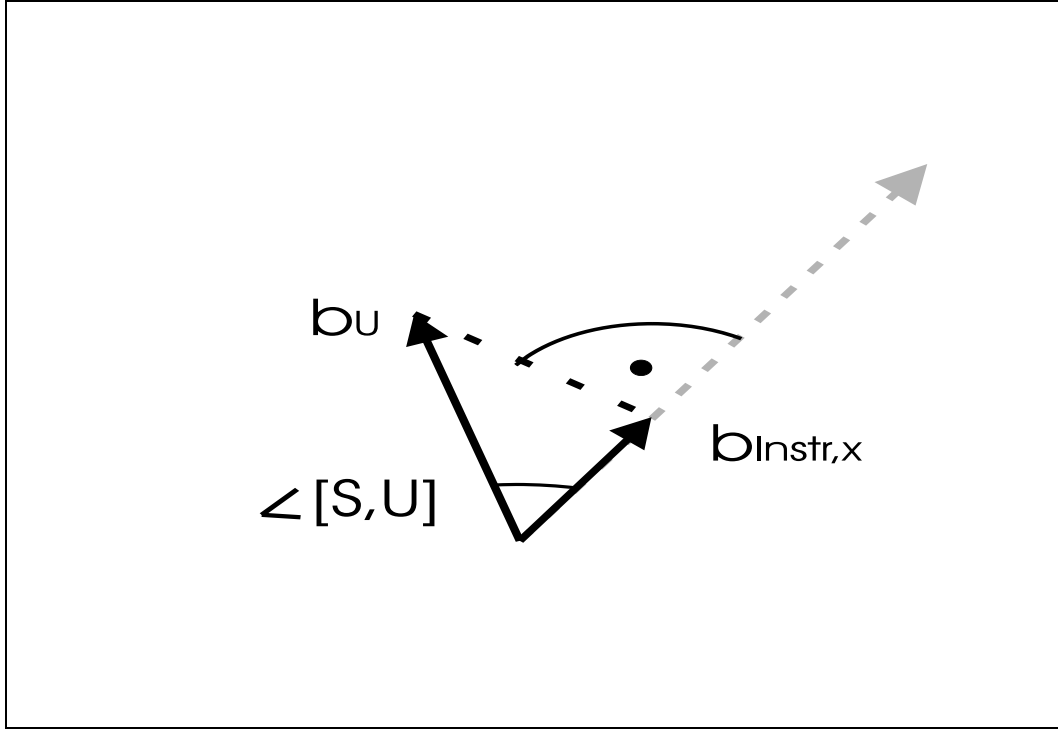


Abbildung 3.1: Abbildung einer magnetischen Induktion mittels K-Modell (schematisch)

mit

$$l_1 = e_1 \cos(\angle[S, U]), \quad (3.5)$$

$$l_2 = e_1 \cos(\angle[S, V]), \quad (3.6)$$

$$l_3 = e_1 \cos(\angle[S, W]) \quad (3.7)$$

überführen. Mit dem Wissen, dass das Koordinatensystem des Laborsystems ein Orthonormalsystem ist, ergibt sich unter Berücksichtigung von

$$1 = \cos(\angle[S, U])^2 + \cos(\angle[S, V])^2 + \cos(\angle[S, W])^2$$

für die Koeffizienten:

$$e_1 = \pm \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}, \quad (3.8)$$

$$\cos(\angle[S, U]) = \frac{l_1}{e_1}, \quad (3.9)$$

$$\cos(\angle[S, V]) = \frac{l_2}{e_1}, \quad (3.10)$$

$$\cos(\angle[S, W]) = \frac{l_3}{e_1}. \quad (3.11)$$

Mit der Wahl des positiven Vorzeichens in Gl.(3.8) ist die Lage und Empfindlichkeit des Sensors eindeutig beschrieben. Die Koeffizienten  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  können direkt aus den

Kalibriervektoren durch eine Bestapproximation im Quadratmittel bestimmt werden. Weitere Ausführungen zur Bestimmung der Koeffizienten aus Kalibriervektoren sowie der Abschätzung der Güte der Anpassung finden sich im Abschnitt 3.2.1.

Das K-Modell kann auch unter der Annahme, dass ein Dreiachssensor aus drei einzelnen Einachssensoren aufgebaut werden kann, direkt auf einen Dreiachssensor erweitert werden. Dabei wird eine mögliche Wechselwirkung der Einzelsensoren untereinander vernachlässigt. Dieser Einfluss wird im Abschnitt 6.9 behandelt. Es ergibt sich

$$b_{\text{Instr},x} = e_1 \cos(\angle[S_x, U])b_u + e_1 \cos(\angle[S_x, V])b_v + e_1 \cos(\angle[S_x, W])b_w, \quad (3.12)$$

$$b_{\text{Instr},y} = e_2 \cos(\angle[S_y, U])b_u + e_2 \cos(\angle[S_y, V])b_v + e_2 \cos(\angle[S_y, W])b_w, \quad (3.13)$$

$$b_{\text{Instr},z} = e_3 \cos(\angle[S_z, U])b_u + e_3 \cos(\angle[S_z, V])b_v + e_3 \cos(\angle[S_z, W])b_w \quad (3.14)$$

oder in vektorieller Schreibweise

$$\underline{b}_{\text{Instr}} = \underline{\underline{M}}_1 \underline{b}_{\text{Labor}} \quad (3.15)$$

mit

$$\underline{\underline{M}}_1 = \begin{pmatrix} e_1 \cos(\angle[S_x, U]) & e_1 \cos(\angle[S_x, V]) & e_1 \cos(\angle[S_x, W]) \\ e_2 \cos(\angle[S_y, U]) & e_2 \cos(\angle[S_y, V]) & e_2 \cos(\angle[S_y, W]) \\ e_3 \cos(\angle[S_z, U]) & e_3 \cos(\angle[S_z, V]) & e_3 \cos(\angle[S_z, W]) \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Wieder lassen sich Empfindlichkeiten und Lage der drei Sensoren zum Laborsystem bestimmen. Zudem gelingt mit einem Dreiachssensor die Umkehrabbildung, die die gemessenen Magnetfeldwerte des Sensors durch Tausch der Eingangs- und Ausgangsgrößen in das Koordinatensystem des Laborsystems überführt. Dann ist:

$$\underline{b}_{\text{Labor}} = \underline{\underline{M}}_2 \underline{b}_{\text{Instr}}. \quad (3.17)$$

Dieser Ansatz und die Bestimmung der dazugehörigen Koeffizienten erlauben eine Korrektur der Messwerte des Instruments bei seinem Einsatz. Die Matrix  $\underline{\underline{M}}_2$  ist aufgrund der Berechnungsmethode mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate nicht die Inverse zu  $\underline{\underline{M}}_1$ . Für das Beispiel aus Abschnitt 2.2 ergibt sich zum Beispiel die Matrix  $\underline{\underline{M}}_1$  der Anpassung zu:

$$\underline{\underline{M}}_1 = \begin{pmatrix} 0.99404 & -0.010838 & -0.0048864 \\ 0.0098803 & 0.98913 & -0.0084339 \\ -0.0010818 & -0.0065943 & 0.99732 \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

Die Matrix  $\underline{\underline{M}}_2$  für die Umkehrabbildung liefert:

$$\underline{\underline{M}}_2 = \begin{pmatrix} 1.0057 & 0.010744 & 0.0050266 \\ -0.010009 & 1.0117 & 0.0093979 \\ 0.00096227 & 0.0070052 & 1.0028 \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

Damit  $\underline{\underline{M}}_1$  die Inverse zu  $\underline{\underline{M}}_2$  ist, muss

$$\underline{\underline{M}}_1 \underline{\underline{M}}_2 \stackrel{!}{=} \underline{\underline{I}} \quad (3.20)$$

mit der Einheitsmatrix  $\underline{I}$  gelten. Das Produkt von  $\underline{M}_1$  und  $\underline{M}_2$  ergibt sich aber zu

$$\underline{M}_1 \underline{M}_2 = \begin{pmatrix} 0.999818 & -0.000306 & 0.000008 \\ 0.000057 & 1.000749 & 0.000889 \\ 0.002111 & 0.000306 & 1.000049 \end{pmatrix}. \quad (3.21)$$

Aus der Matrix  $\underline{M}_2$  lassen sich neun Parameter des Instruments abschätzen:

- (3x) Empfindlichkeit,
- (3x) Interne Richtung der Achsen des Instruments zueinander,
- (3x) Richtung der magnetischen Achsen des Instruments gegen das Spulensystem.

Ferner ist aus den so bestimmten Instrumentenparametern

- eine Matrix zur Orthogonalisierung der Instrumentendaten,
- die Drehung des Sensors als Ganzes gegen das Spulensystem

ableitbar. Das Modell in Gl.(3.17) enthält einen Anteil in  $\underline{M}_2$ , der allein durch den Messaufbau bei der Kalibrierung bestimmt wird und die Drehung des Sensors als Ganzes gegen das Spulensystem beschreibt.

Da der Sensor nach der Kalibrierung in einer anderen mechanischen Position und Lage verwendet wird, muss der für den Messaufbau spezifische Anteil separiert werden, um ihn eliminieren zu können. Hierzu wird das folgende Verfahren vorgeschlagen:

$\underline{M}_2$  wird in drei Teilmatrizen

$$\underline{M}_2 = \underline{D}_{\text{Euler}} \underline{Q} \underline{E} \quad (3.22)$$

zerlegt. Damit wird die Abbildung, der vom Instrument gemessenen Vektoren  $\underline{b}_{\text{Instr}}$ , in einzelne Teilschritte zerlegt:

1. Die Messwerte werden zunächst in ihrer Empfindlichkeit korrigiert ( $\underline{E}$ ).
2. Nach einer Orthogonalisierung durch  $\underline{Q}$  werden sie in
3. durch  $\underline{D}_{\text{Euler}}$  in Richtung des Spulensystems gedreht.

Für den eigentlichen Korrekturalgorithmus ergibt sich damit:

$$\underline{b}_{\text{korrigiert}} = \underline{Q} \underline{E} \underline{b}_{\text{Instr}}. \quad (3.23)$$

Hierbei bleibt die Matrix  $\underline{D}_{\text{Euler}}$  unberücksichtigt, da sie abhängig vom Aufbau bei den Kalibriermessungen ist, und willkürlich gewählt werden kann.

$\underline{M}_2$  wird wie folgt zerlegt:

### Schritt 1: Abspaltung der Empfindlichkeitsmatrix

Mit der Annahme, dass es sich bei  $\underline{\underline{E}}$  um eine lineare Abbildung handelt, also das Instrument in seiner Empfindlichkeit als linear beschrieben werden kann, folgt

$$\underline{\underline{M}}_2 = \begin{pmatrix} \frac{m_{11}}{E'_x} & \frac{m_{12}}{E'_y} & \frac{m_{13}}{E'_z} \\ \frac{m_{21}}{E'_x} & \frac{m_{22}}{E'_y} & \frac{m_{23}}{E'_z} \\ \frac{m_{31}}{E'_x} & \frac{m_{32}}{E'_y} & \frac{m_{33}}{E'_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_x & 0 & 0 \\ 0 & E'_y & 0 \\ 0 & 0 & E'_z \end{pmatrix} = \underline{\underline{M}}_2' \underline{\underline{E}}, \quad (3.24)$$

wobei

$$E'_x = \sqrt{m_{11}^2 + m_{21}^2 + m_{31}^2}, \quad (3.25)$$

$$E'_y = \sqrt{m_{12}^2 + m_{22}^2 + m_{32}^2}, \quad (3.26)$$

$$E'_z = \sqrt{m_{13}^2 + m_{23}^2 + m_{33}^2} \quad (3.27)$$

gilt. Die Länge von  $E'_x, E'_y, E'_z$  wird durch die Normierung des Einheitsvektors im Laborsystem gegeben. Die interne Ausrichtung der Sensorachsen zueinander ist dann bestimmt durch die Lage der einzelnen Sensorachsen zum Laborsystem. Sie kann mittels der Nutzung des Skalarproduktes zwischen verschiedenen Achsen bestimmt und im orthogonalen Koordinatensystem des Referenzsystems angegeben werden. Es gilt dann für die Winkel zwischen den einzelnen Sensorachsen

$$\cos \xi_{xy} = \frac{1}{E'_x E'_y} [m_{11}m_{12} + m_{21}m_{22} + m_{31}m_{32}], \quad (3.28)$$

$$\cos \xi_{yz} = \frac{1}{E'_y E'_z} [m_{12}m_{13} + m_{22}m_{23} + m_{32}m_{33}], \quad (3.29)$$

$$\cos \xi_{xz} = \frac{1}{E'_x E'_z} [m_{11}m_{13} + m_{21}m_{23} + m_{31}m_{33}]. \quad (3.30)$$

### Schritt 2: Trennung der Orthogonalisierungs- und der Drehmatrix

Es gilt :

$$\underline{\underline{M}}_2' = \underline{\underline{D}}_{\text{Euler}} \underline{\underline{Q}}. \quad (3.31)$$

Die Konstruktion der Matrix  $\underline{\underline{Q}}$  erfolgt unter der Annahme, dass die  $X$ -Achse des Instruments und die  $U$ -Achse des Laborsystems zusammen fallen (Abbildung 3.2  $\underline{\underline{e}}_1$ ). Für die  $Y$ -Achse des Instruments wird angenommen, dass sie in der  $UV$ -Ebene des Laborsystems liegt (Abbildung 3.2  $\underline{\underline{e}}_2$ ). Die Lage der  $Z$ -Achse des Instruments wird schließlich durch zwei Winkel zwischen der  $U$ -Achse und der  $V$ - bzw.  $W$ -Achse bestimmt (Abbildung 3.2  $\underline{\underline{e}}_3$ ). Werden  $\underline{\underline{e}}_1$ – $\underline{\underline{e}}_3$  in die Transformationsmatrix  $\underline{\underline{Q}}$  eingetragen, so ergibt sich

$$\underline{\underline{Q}} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \beta & \sin \gamma \\ 0 & \cos \beta & \cos \gamma \sin \eta \\ 0 & 0 & \cos \gamma \cos \eta \end{pmatrix}, \quad (3.32)$$

wobei die Winkel  $\beta, \gamma, \eta$  gemäß Abbildung 3.2 definiert sind.

Wird der Winkel der drei Achsen des Instruments zueinander im Laborsystem berech-

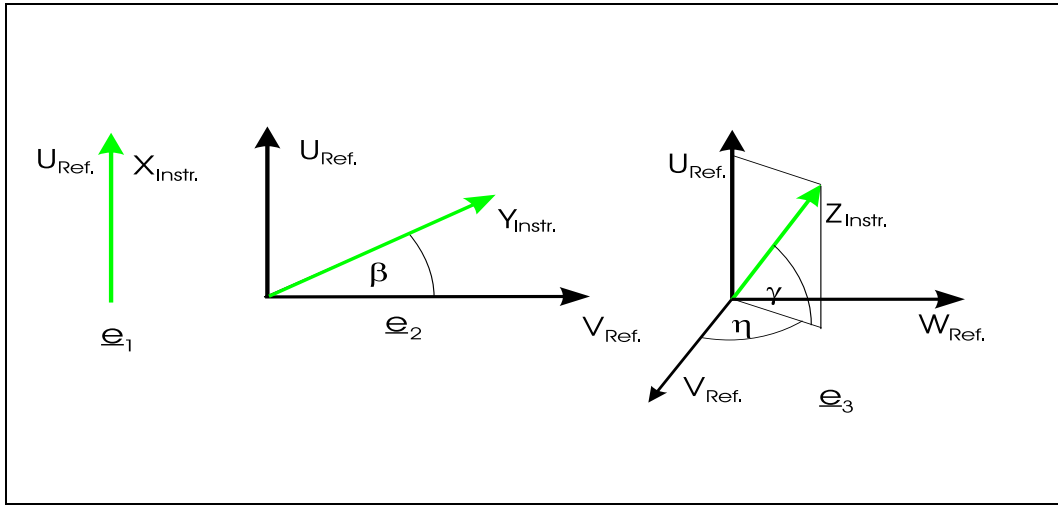


Abbildung 3.2: Geometrische Deutung der Orthogonalisierungsmatrix zur Transformation des Instrumentensystems in das Referenzsystem

net, so ergibt sich:

$$\cos \xi_{xy} = \underline{e}_1 \cdot \underline{e}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.33)$$

$$\cos \xi_{xz} = \underline{e}_1 \cdot \underline{e}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \sin \eta \\ \cos \gamma \cos \eta \end{pmatrix}, \quad (3.34)$$

$$\cos \xi_{yz} = \underline{e}_2 \cdot \underline{e}_3 = \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \sin \eta \\ \cos \gamma \cos \eta \end{pmatrix}. \quad (3.35)$$

Ausmultiplizieren liefert

$$\cos \xi_{xy} = \sin \beta, \quad (3.36)$$

$$\cos \xi_{xz} = \sin \gamma, \quad (3.37)$$

$$\cos \xi_{yz} = \sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma \sin \eta. \quad (3.38)$$

Werden in Gl.(3.32) alle von den Winkeln  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$  abhängigen Größen durch Größen mit  $\xi_{xy}$ ,  $\xi_{xz}$  und  $\xi_{yz}$  ersetzt so ergibt sich nach kurzer Rechnung

$$\underline{\underline{Q}} = \begin{pmatrix} 1 & \cos \xi_{xy} & \cos \xi_{xz} \\ 0 & \sin \xi_{xy} & \frac{\cos \xi_{xz} - \cos \xi_{xy} \cos \xi_{yz}}{\sin \xi_{xy}} \\ 0 & 0 & \sqrt{1 - \cos^2 \xi_{xz} - \frac{(\cos \xi_{xz} - \cos \xi_{xy} \cos \xi_{yz})^2}{\sin^2 \xi_{xy}}} \end{pmatrix}. \quad (3.39)$$

$\underline{\underline{D}}_{\text{Euler}}$  wird durch Trennung von  $\underline{\underline{E}}$  und  $\underline{\underline{Q}}$  von  $\underline{\underline{M}}_2$  berechnet. Durch Koeffizientenver-

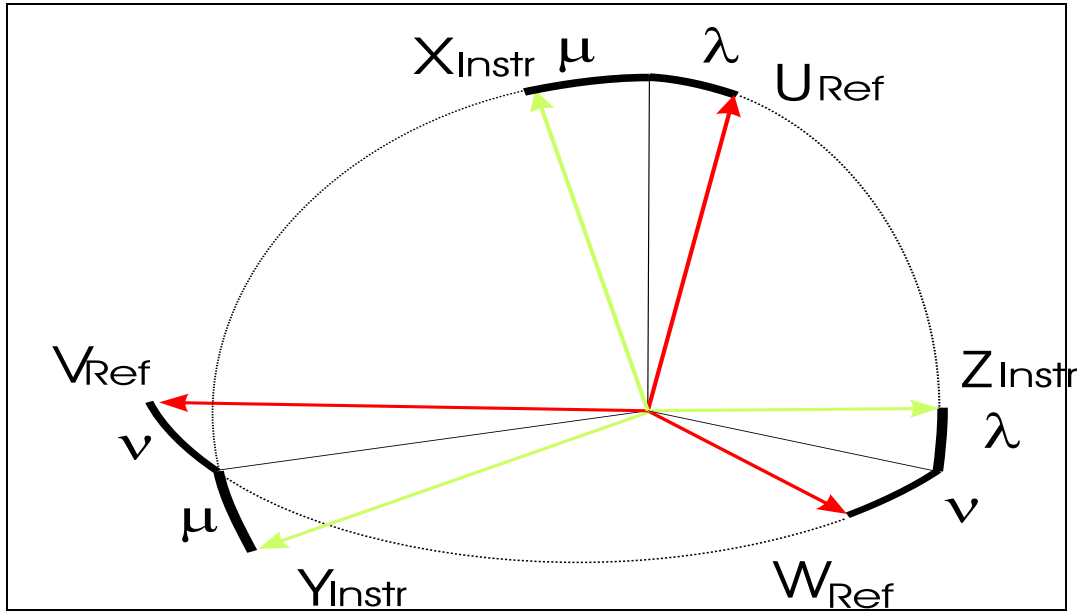


Abbildung 3.3: Geometrische Deutung der Orthogonalisierung des Instrumentensystems und seiner Überführung ins Referenzsystem

gleich von  $\underline{\underline{D}}_{\text{Euler}}$  mit der folgenden Formel für eine Euler Drehung

$$\underline{\underline{D}}'_{\text{Euler}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \mu & 0 & \sin \mu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \mu & 0 & \cos \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos v & -\sin v & 0 \\ \sin v & \cos v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.40)$$

$$\underline{\underline{D}}'_{\text{Euler}} = \begin{pmatrix} \cos v \cos \mu & \sin v \cos \lambda + \cos v \sin \mu \sin \lambda & \sin v \sin \lambda + \cos v \sin \mu \cos \lambda \\ -\sin v \cos \mu & \cos v \cos \lambda - \sin v \sin \mu \sin \lambda & \cos v \sin \lambda - \sin v \sin \mu \cos \lambda \\ \sin \mu & \cos \mu \sin \lambda & \cos \mu \cos \lambda \end{pmatrix}$$

kann die Drehung des Sensortripels als Ganzes gegen das Referenz-Koordinatensystem beschrieben und die Drehwinkel bestimmt werden.

Aus der Vielzahl der möglichen Euler-Drehungen wird bewusst eine 3,2,1 Drehung, also eine Drehung zuerst um die  $W$ -, dann um die  $V$ -, und zuletzt um die  $U$ -Achse gewählt.

Dies trägt dem üblichen Aufbau bei einer Kalibrierung Rechnung, bei dem der zu untersuchende Sensor möglichst genau an den magnetischen Achsen des Laborsystems ausgerichtet wird. Die Wahl einer 1,3,1' Drehung birgt unter diesen Umständen ein hohes Risiko, dass die aus den Teildrehungen aufgebaute Matrix singulär wird.



## 3.2 Bestimmung der linearen Modellkoeffizienten

### 3.2.1 Formale Berechnung

Die Bestimmung der linearen Modellkoeffizienten erfolgt mittels einer Bestapproximation im Quadratmittel. Die mathematischen Grundlagen und Verfahren werden ausführlich in den Arbeiten von [Überhuber 1995, Kowalsky 1979] [Bronstein, Semendjajew 1979, Böhm et al. 1985, Press et al. 1994] beschrieben. Insbesondere fasst [Überhuber 1995] die zu lösende Aufgabenstellung und die hierzu angewandten Techniken zu ihrer numerischen Lösung sehr gut zusammen. An dieser Stelle werden nur einige für die weitere Vorgehensweise relevante Teilaspekte angesprochen. Dies geschieht ohne allzusehr auf den mathematischen Apparat im Hintergrund einzugehen.

Für das Beispiel in Gl.(3.4)

$$b_{\text{Instr},x} = l_1 b_u + l_2 b_v + l_3 b_w$$

folgt eine Anpassung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei soll die Summe der Differenzen zwischen Modell und Messung aus  $N$  Kalbriervektoren minimiert werden.

$$\sum_{i=1}^N (l_1 b_{u,i} + l_2 b_{v,i} + l_3 b_{w,i} - b_{\text{Instr},i})^2 \stackrel{!}{=} \text{Min} \quad (3.41)$$

Eine hierfür notwendige Bedingung lautet, dass die ersten Ableitungen nach den Koeffizienten  $l_1, l_2$  und  $l_3$  verschwinden.

$$\frac{\partial}{\partial l_1} : 2 \sum_{i=1}^N ((l_1 b_{u,i} + l_2 b_{v,i} + l_3 b_{w,i} - b_{\text{Instr},i}) b_{u,i}) = 0, \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial}{\partial l_2} : 2 \sum_{i=1}^N ((l_1 b_{u,i} + l_2 b_{v,i} + l_3 b_{w,i} - b_{\text{Instr},i}) b_{v,i}) = 0, \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial}{\partial l_3} : 2 \sum_{i=1}^N ((l_1 b_{u,i} + l_2 b_{v,i} + l_3 b_{w,i} - b_{\text{Instr},i}) b_{w,i}) = 0. \quad (3.44)$$

Dies führt auf ein lineares Gleichungssystem in  $l_1, l_2$  und  $l_3$ . Nach einiger Umformung der Terme folgt mit

$$\langle \dots \rangle := \sum_{i=1}^N \dots, \quad (3.45)$$

$$\begin{pmatrix} \langle b_{u,i} b_{u,i} \rangle & \langle b_{v,i} b_{u,i} \rangle & \langle b_{w,i} b_{u,i} \rangle \\ \langle b_{u,i} b_{v,i} \rangle & \langle b_{v,i} b_{v,i} \rangle & \langle b_{w,i} b_{v,i} \rangle \\ \langle b_{u,i} b_{w,i} \rangle & \langle b_{v,i} b_{w,i} \rangle & \langle b_{w,i} b_{w,i} \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle b_{\text{Instr},i} b_{u,i} \rangle \\ \langle b_{\text{Instr},i} b_{v,i} \rangle \\ \langle b_{\text{Instr},i} b_{w,i} \rangle \end{pmatrix}. \quad (3.46)$$

Das Gleichungssystem(3.46) hat eine eindeutige Lösung, sofern mindestens drei linear unabhängige Kalibriervektoren verwendet werden.

### 3.2.2 Bestimmung der Güte der Anpassung

Obwohl die lineare Anpassung ein eindeutiges Ergebnis liefert, sofern mindestens drei linear unabhängige Felder im Laborsystem produziert werden und in die Anpassung eingehen, kann dennoch keine Aussage über die Güte der Anpassung global getroffen werden. Bei der Verwendung von nur drei linear unabhängigen Feldern, liefert die Anpassung eine Punktapproximation, die formal an den drei Punkten die Messwerte fehlerfrei approximiert. In wie weit diese Approximation an anderen Punkten gültig ist, bleibt unbestimmt, da über alle anderen Feldkonfigurationen des Laborsystems keine Aussage bezüglich der Übertragung auf den Sensor getroffen werden kann.

Um eine globale Aussage über die Güte einer Anpassung gewinnen zu können, werden in dieser Arbeit sogenannte Testvektoren verwendet. Jeder Testvektor besteht aus einer Feldkonfiguration des Laborsystems und der gemessenen Antwort des untersuchten Instruments. Testvektoren müssen nicht unbedingt zur Anpassung der Koeffizienten verwendet werden. In jedem Testvektor wird ein Teil, entweder die Feldkonfiguration oder die Antwort des Instruments mit den Koeffizienten der ermittelten Übertragungsfunktion korrigiert. Dieser Teil bildet den Istwert. Dieser wird mit dem Sollwert bestehend aus dem anderen Teil des Testvektors verglichen,

$$\underline{b}_{\text{Rest}} = \underline{b}_{\text{Ist}} - \underline{b}_{\text{Soll}}. \quad (3.47)$$

Eine statistische Auswertung der Restfehler vieler Testvektoren liefert Aussagen zur Güte der Anpassung. Minimum und Maximum der Residuen liefern die maximal gemessene Abweichung. Mittelwert und Standardabweichung liefern die nach der Korrektur zu erwartenden Restfehler. Der Fehler nach der Anpassung eines Test- bzw. Kalibriervektors ist bestimmt durch systematische und statistische Anteile. Auf Grundlage der Kalibriervektoren werden die Koeffizienten eines geeigneten Modells bestimmt. Hierfür wird eine Bestapproximation im Quadratmittel auf das im Abschnitt 3.1 vorgestellte und die im Abschnitt 4.2 noch vorzustellenden Modelle angewendet. Die Auswahl der verwendeten Koeffizienten folgt zum einen der Richtlinie, die Summe der Residuen zu minimieren, zum anderen wird aber auch ein Modell mit möglichst wenigen Parameter gesucht (siehe auch Kapitel 6.2).

Damit ist auch der Fehler des mathematischen Modells des Instruments direkt von den einzelnen Fehlern der Kalibriervektoren abhängig. Die wesentliche Handarbeit bei der Auswertung einer Kalibriermessung besteht in der Detektion und der Korrektur aller systematischen Fehler. Sind diese korrigiert, so bleibt als Fehlergröße nur noch der statistische Fehler übrig, der bei einer physikalischen Messwertbestimmung der Normal-Verteilung folgt. Im Umkehrschluß bedeutet dies, dass unkorrigierte systematische Fehlergrößen eine Rolle spielen, falls die Residuen nach einer Anpassung nicht normal verteilt sind.

Eine signifikante Aussage darüber, ob der Statistik der Residuen einer Anpassung eine Normal-Verteilung zu Grunde liegt oder nicht, kann auf Grund der normalerweise für eine systematische Untersuchung zu geringen Zahl an Vektoren (typischerweise etwa 300) nicht eindeutig getroffen werden<sup>1</sup>. Aus diesem Grund werden die Resi-

---

<sup>1</sup>Der Spezialfall einer Auswertung einer Kalibriermessung mit einigen tausend Vektoren wird an einem Beispiel im Kapitel 6.2 behandelt.

duen über verschiedenen Parametern der Kalibrierung (zum Beispiel Zeit, Eingangsfeldgrößen) zur Fehlerbetrachtung aufgetragen. Werden bei dieser Auftragung signifikante Strukturen entdeckt, so ist dies ein Zeichen dafür, dass sich noch weitere systematische Fehler, die vom mathematischen Modell nicht erfasst werden, in den Daten befinden. Weitere Untersuchungen müssen dann erfolgen, um den Ursprung und die Wirkungsweise dieser systematischen Effekte zu ergründen und falls möglich zu beseitigen.

### 3.3 Auswahl geeigneter Testvektoren

Bereits im Abschnitt 3.2.1 ist deutlich geworden, dass die Auswahl der bei einer Anpassung zu verwendenden Messvektoren eine Rolle spielt. Es ist durchaus möglich, durch eine unterschiedliche Gewichtung einzelner Testvektoren die Anpassung der Übertragungsfunktion in gewissen Regionen des Magnetfeldraumes zu verbessern. Dies bedeutet aber auch eine Verschlechterung der Anpassung in anderen Regionen. Ohne weitere Vorinformation ist deshalb eine möglichst gleichverteilte große Zahl an Testvektoren als Grundlage der Anpassung anzustreben. Die Zahl der Messvektoren wird durch zwei Faktoren begrenzt. Zum einen müssen die Umweltbedingungen im Laborsystem während der Messung möglichst konstant gehalten werden, zum anderen steht Zeit nicht unbegrenzt zur Verfügung. Die folgenden drei Abschnitte beschreiben verschiedene Strategien, eine geeignete Anzahl von Messvektoren für eine Auswertung zu bestimmen.

#### 3.3.1 Achsenmessung

Der Messtyp der sogenannten Achsenmessung wurde bereits im Beispiel im Abschnitt 2.2 vorgestellt. Dieser Typ einer Kalibrierung wird seit Jahrzehnten eingesetzt. Seine Vorteile ergeben sich dadurch, dass die Magnetfelder bzw. die magnetische Induktion des Laborsystems nur in jeweils einer Richtung entlang einer Achse zu einem Zeitpunkt variiert werden.

Unter der Vorgabe, dass die Antwortfunktion des Instruments in erster Näherung linear zu den im Laborsystem erzeugten Magnetfeldern ist, ergeben sich Geraden, wenn die Messwerte des Instruments über den durch das Laborsystem erzeugten Feldern aufgetragen werden. Die Steigung jeder einzelnen Geraden entspricht dabei einem Koeffizienten in der Übertragungsmatrix  $\underline{\underline{M}}_1$  in Gl.(3.15). Damit ist es nicht mehr notwendig, die Koeffizienten der Matrix mittels des Verfahrens der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus Abschnitt 3.2.1 zu bestimmen. Vielmehr können die einzelnen Koeffizienten direkt manuell berechnet werden. Dieser Punkt ist wesentlich, da so während der kostbaren Messzeit direkt das zu erwartende Ergebnis abgeschätzt werden kann und zusätzlich die Möglichkeit besteht, jeden einzelnen Messwert auf seine Plausibilität sofort zu überprüfen.

Mit diesem Typ der Messung sind allerdings auch Nachteile verbunden. Verwendet man die Steigung der Geraden zur Bestimmung der Koeffizienten anstelle einer Bestapproximation im Quadratmittel, so sind strenge Anforderungen an das Laborsystem zu stellen. Soll beispielsweise ein magnetischer Feldvektor des Laborsystems in

Richtung  $U$  für die Anpassung verwendet werden, so ist ein Vektor, der auch geringe Feldwerte in  $V$  und  $W$  erzeugt, nicht zur Auswertung mittels der Geraden geeignet. Tatsächlich lassen sich aber häufig die Arbeitspunkte der Verstärker, die den Vektor der magnetischen Induktion im Laborsystem produzieren, nicht so exakt einstellen. Sehr wohl kann aber der tatsächlich eingestellte Arbeitspunkt exakt bestimmt werden. Damit ergibt sich typischerweise die Situation, dass die Sollwerte der Magnetfeldvektoren bzw. der magnetischen Induktion im Laborsystem beispielsweise  $(45000, 0, 0)$  und  $(50000, 0, 0)$  nT betragen sollen, tatsächlich aber  $(45010, 15, 1)$  und  $(50015, 8, -5)$  nT betragen. Diese tatsächlich erzeugten Magnetfeldvektoren eignen sich wenig für das Verfahren zur Bestimmung der Koeffizienten mittels der Steigung der Geraden. Selbst wenn die Koeffizienten der Übertragungsfunktion anhand einer Achsenmessung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden, decken die Magnetfeldvektoren den tatsächlich vom Instrument aufgespannten Magnetfeldraum  $XYZ$  nur unzureichend, nämlich entlang der Achsen, ab. Dieser Grad der Abdeckung ist nur ausreichend für die Anpassung eines linearen Modells. Er deckt aber alle übrigen Bereiche nicht ab, sodass es vorkommen kann, dass bestimmte Eigenheiten des untersuchten Magnetometers nicht detektiert werden.

Aus diesem Grund bildet die Achsenmessung zwar noch die Basis der Kalibriermessungen und ist auch völlig ausreichend im Falle, dass die linearen Koeffizienten eines bekannten Magnetometers zum Beispiel zur Lagebestimmung des Instruments im Laborsystem, bestimmt werden sollen. Sie muss aber bei der Untersuchung eines Magnetometers mit unbekannten Eigenschaften durch einen anderen Messungstyp ergänzt werden.

#### 3.3.2 Spike–Sphere–Messung

Der Messtyp der Stachelkugel (engl. Spike–Sphere) ist so konstruiert, dass der Magnetfeldraum des zu untersuchenden Magnetometers möglichst gleichmäßig abgetastet wird. Die Sequenz einer Spike–Sphere–Messung besteht typischerweise aus etwa 320 Magnetfeldvektoren. Der erste Teil der Sequenz wird zur Erzeugung von Magnetfeldvektoren auf einer Kugelschalenoberfläche im Magnetfeldraum verwendet. Hierzu wird ein Magnetfeldvektor mit konstanten Betrag in der Weise gedreht, dass er die Kugelschalenoberfläche, auf der seine Endpunkte liegen, möglichst gleichmäßig überdeckt. Im zweiten Teil der Sequenz werden dann im Inneren der Kugel weitere Messvektoren zufällig, aber möglichst gleichverteilt aufgenommen.

Leider bringt dies Verfahren einen Verlust der Anschaulichkeit mit sich. Um einen Überblick über die Abweichungen einer Anpassung grafisch anschaulich zu machen, werden die Restfehler nach einer Anpassung zwischen Modell und Messwerten aufgetragen. Als Abzisse wird entweder die Zeit oder einer der Eingabeparameter verwendet. Ein ausführliches Beispiel einer Spike–Sphere–Messung an einem Dreiachssensor findet sich im Abschnitt 3.7.4.

#### 3.3.3 „Ali“–Messung

Die „Alignment“– oder „Ali“–Messung dient zur Bestimmung der Lage des zu untersuchenden Sensors im Laborsystem und einer groben Bestimmung seiner Empfind-

lichkeit. Hierbei handelt es sich um ein Minimalmodell, bei dem mit möglichst wenig Messschritten ein lineares Modell des zu untersuchenden Sensors abgeleitet werden kann. Die im Laborsystem erzeugte Magnetfeldvektorsequenz sieht wie folgt aus:

1. Nullfeld
2. Magnetfeld in  $+U$  Richtung
3. Magnetfeld in  $-U$  Richtung
4. Magnetfeld in  $+V$  Richtung
5. Magnetfeld in  $-V$  Richtung
6. Magnetfeld in  $+W$  Richtung
7. Magnetfeld in  $-W$  Richtung
8. Nullfeld

Diese Magnetfeldsequenz reicht aus, ein lineares Modell des Sensors zu bestimmen. Die Messung ist zeitlich sehr kurz und kann wie eine Achsenmessung ausgewertet werden. Ein ausführliches Beispiel einer „Ali“-Messung an einem Dreiachsensensor findet sich im Abschnitt 3.7.3.

## 3.4 Offset des Magnetometers und Restfeld des Laborsystems

Bereits am Beispiel aus Abschnitt 2.2 wird ersichtlich, dass das im Abschnitt 3.1 beschriebene lineare K-Modell eines Magnetometers nicht ausreichend ist, die mit dem Sensor aufgezeichneten Messwerte zu beschreiben. Es fällt besonders auf, dass jedem Sensor des untersuchten Instruments nach der Anpassung ein im wesentlichen konstanter von Null verschiedener Restfehler zugeordnet werden muss. Dieser Restfehler kann im linearen Modell für das Beispiel in Gl.(3.4), die mit

$$b_{\text{Instr},x} = l_1 b_u + l_2 b_v + l_3 b_w$$

angegeben war, formal durch einen zusätzlichen konstanten Koeffizienten  $l_0$  minimiert werden. Dann ist

$$b_{\text{Instr},x} = l_0 + l_1 b_u + l_2 b_v + l_3 b_w. \quad (3.48)$$

Jeder Magnetometerkomponente ist ein Offset  $b_{\text{Offset}}$  zu zuordnen, wobei unter dem Offset der Magnetometerkomponente der Wert zu verstehen ist, den die Magnetometerkomponente im Nullfeld liefert [Kertz 1969, Ness 1970]. Dieser Offset und das im Laborsystem bestehende magnetische Restfeld  $b_{\text{Rest}}$  sind damit Bestandteile des Koeffizienten  $l_0$ . Sofern keine weiteren unbekannten Anteile auftreten ergibt sich damit

$$l_0 = b_{\text{Offset}} + b_{\text{Rest}}. \quad (3.49)$$

### 3.4.1 Verfahren zur Bestimmung von Offset und Restfeld

Da sich der Offset des Magnetometers und das „Restfeld“ überlagern, sind sie durch eine einzelne Messung in einer geometrischen Lage nicht zu bestimmen. Durch Drehen des Sensors um 180 Grad im „Nullfeld“ des Laborsystems gelingt es jedoch den Offset des Instruments vom Restfeld des Laborsystems zu separieren. Es sei  $b_1$  die erste Messung und  $b_2$  die zweite Messung im Nullfeld der Anlage, wobei der Sensor um 180 Grad gedreht wird. Dann ergibt sich das Restfeld  $b_{\text{Rest}}$  zu

$$b_{\text{Rest}} = \frac{b_1 - b_2}{2}. \quad (3.50)$$

Ganz analog ergibt sich der Offset  $b_{\text{Off}}$  zu

$$b_{\text{Off}} = \frac{b_1 + b_2}{2}. \quad (3.51)$$

### 3.4.2 Eliminierung des Einflusses von Offset und Restfeld während einer Kalibriermessung

Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die „inneren“ Parameter des Instruments zeitlich invariant sind. Da der Parameter  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  jedoch nicht unbedingt invariant gegen die Zeit ist (siehe auch Abschnitt 2.4.6), sollte er korrigiert werden, um so eine zeitliche Invarianz der Übertragungsfunktion zu gewährleisten.

Idealerweise sollte  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  kontinuierlich gemessen und korrigiert werden. Da hierfür aber ein weiterer Sensor in der Nähe des zu kalibrierenden Sensors erforderlich ist, kann eine direkte Korrektur fast nie realisiert werden<sup>2</sup> (siehe Abschnitt 3.6). Um dennoch eine zeitliche Variation von  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  detektieren und eventuell korrigieren zu können, werden in bestimmten Zeitabständen, zumindest aber am Anfang und am Ende einer Messreihe, sogenannte Nullfelder vermessen. Dabei wird versucht ein exaktes Nullfeld für  $\underline{b}_{\text{Ref}}$  zu erzeugen. Dieses Feld wird mit dem Sensor vermessen. Eine Zeitreihe über alle Nullfelder liefert einen wichtigen Anhaltspunkt dafür, wie stark  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  sich im Laufe der Messung geändert hat. Ist die Drift von  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  langsam gegenüber der Abtastrate der Nullfelder, so kann die in Richtung der magnetischen Achse des Sensors weisende Komponente von  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  und  $\underline{b}_{\text{Instr}}$  durch Differenzbildung mit der Zeitreihe über alle Nullfelder korrigiert werden. Im einfachsten Fall wird im Nullfeld der Vektor ( $\underline{b}_{\text{Ref}}, \underline{b}_{\text{Instr}}$ ) bestimmt und von allen folgenden Vektoren der Messreihe abgezogen. Damit verschwindet der Einfluss sowohl von  $\underline{b}_{\text{Rest}}$  als auch von  $\underline{b}_{\text{Off}}$ .

## 3.5 Weitere Parameter des Instruments

Häufig werden Kalibriermessungen eingesetzt, um ein zu untersuchendes Instrument komplett zu überprüfen. Vor diesem Hintergrund gewinnen andere Mess- und Auswer-

<sup>2</sup>Der zusätzliche Sensor beeinflusst den zu kalibrierenden Sensor, beziehungsweise das zu untersuchende Magnetfeld durch seine Anwesenheit bei einem geringen Abstand (siehe auch Abschnitt 6.6). Bei großem Abstand zwischen den Sensoren ist das Restfeld der Anlage am Ort des zusätzlichen Sensors bedingt durch Feldgradienten sicher ein anderes als am Ort des zu kalibrierenden Sensors.

teverfahren an Bedeutung, die nicht immer direkt etwas mit den bisher behandelten Verfahren zu tun haben.

### 3.5.1 Der Einfluss der Temperatur

Soll das Temperaturverhalten eines Sensors untersucht werden, so kann er in der im Anhang A beschriebenen unmagnetischen Thermaluntersuchungsbox platziert werden. Dadurch wird er von der Umgebung des Spulensystems thermisch isoliert. In der Box kann er definierten Temperaturen ausgesetzt werden, die über einen möglichst langen Zeitraum innerhalb einer gewissen Bandbreite konstant gehalten werden.

Die Isolierung des Sensors innerhalb der Thermaluntersuchungsbox empfiehlt sich auch deshalb, weil sich sonst das Temperaturgefüge innerhalb des Spulensystems ändern würde. Eine Änderung des Temperaturgefüges hat mit Sicherheit Auswirkungen auf das in der Anlage erzeugte Magnetfeld (siehe auch Abschnitt 2.4.6). Für jedes einzelne Temperaturniveau werden so die relevanten Parameter des zu untersuchenden Sensors bestimmt. Parameter verschiedener Temperaturniveaus lassen sich vergleichen. Dadurch kann der Einfluss der Temperatur auf den Sensor modelliert werden. Untersuchungen des Temperaturverhaltens eines einzelnen Einachssensors erweisen sich in der Praxis als sehr schwierig, da mechanische Bewegungen des Sensors innerhalb der Thermaluntersuchungsbox nicht von mechanischen Bewegungen des Testaufbaus separiert werden können.

Soll die Temperaturabhängigkeit eines Sensortripels untersucht werden, so erweist es sich als sinnvoll, bei verschiedenen, aber konstanten Temperaturniveaus Linearitätsmessungen bzw. Spike–Sphere–Messungen durchzuführen. Dann kann für jedes der verschiedenen Temperaturniveaus ein Modell des Instruments erstellt werden und das Verhalten des Instruments über die Veränderung der Modelle beschrieben werden.

Als weniger sinnvoll erweist sich die dynamische Untersuchung des Temperaturverhaltens eines Sensortripels, also das Messen eines konstanten Feldes in der Anlage bei gleichzeitiger Variation der Temperatur, da hierbei die Lage des Sensortripels nicht exakt kontrolliert werden kann. Eine Bewegung des Sensortripels innerhalb des Testaufbaus durch Temperaturvariation wird dann fälschlicherweise dem Temperaturverhalten des Sensortripels zu gerechnet. Ein ausführliches Beispiel für die Auswertung der Temperaturabhängigkeit eines Dreiachssensors findet sich unter Abschnitt 3.7.6.

### 3.5.2 AC–Parameter

Im Rahmen der Kalibrierung sind die folgenden AC–Parameter von besonderem Interesse:

- äquidistante Abtastrate bei der Digitalisierung,
- analoger Amplituden– und Phasengang eines jeden Sensors,
- Laufzeit eines Signals vom Sensor bis zur digitalen Abtastung,
- Differenzen der Laufzeiten bzw. der Abtastung zu unterschiedlichen Zeiten zwischen zwei Kanälen,

- Verteilung der Werte des abgetasteten Signal.

#### Bestimmung der Abtaste

Die genaue Kenntnis der Digitalisierungsrate ist für die Auswertung von Wechselgrößen unerlässlich. Sie kann dadurch bestimmt werden, dass ein bekanntes Sinussignal auf das Spulensystem gegeben, und dann mit dem Magnetometer aufgenommen wird. Ein mit bekannter Frequenz abgetastetes Wechsellsignal  $Y_{\text{mess}}$  kann zu jedem Zeitpunkt  $t$  durch die Superposition einer (un)endlichen Anzahl von  $N$  Sinusfunktionen unterschiedlicher Frequenz modelliert werden. Der grundlegende Formalismus ergibt sich nach [Kügler 1992] aus

$$Y_{\text{mess}} = X_0 + \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \phi_i). \quad (3.52)$$

Hierbei bezeichnet  $\omega_i$  die unterschiedlichen Kreisfrequenzen und  $\phi_i$  die entsprechenden Phasenwinkel. Mit einem einfachen Additionstheorem kann Gl.(3.52) umgeformt werden in

$$Y_{\text{mess}} = X_0 + \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t) \cos(\phi_i) + A_i \cos(\omega_i t) \sin(\phi_i). \quad (3.53)$$

Mit der Substitution

$$\begin{aligned} X_{1i} &= A_i \cos \phi_i, \\ X_{2i} &= A_i \sin \phi_i \end{aligned}$$

können die Variablen  $X_0, X_{1i}, X_{2i}$  mit einer Approximation im Quadratmittel angepasst werden. Damit ergibt sich basierend auf Gl.(3.53) mit der Annahme, dass  $Y_{\text{mess}}$  an  $m$  Stützstellen  $t_j$  vermessen wird

$$\text{Min} \stackrel{!}{=} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( Y_{\text{mess}j} - \left( X_0 + \sum_{i=1}^N X_{1i} \sin(\omega_i t_j) + X_{2i} \cos(\omega_i t_j) \right) \right)^2. \quad (3.54)$$

Damit dies eintritt, muss für die Ableitungen mit  $1 \leq k \leq N$  gelten:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X_0} &: \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 2 \left( Y_{\text{mess}j} - \left( X_0 + \sum_{i=1}^N X_{1i} \sin(\omega_i t_j) + X_{2i} \cos(\omega_i t_j) \right) \right) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial X_{1k}} &: \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 2 \left( Y_{\text{mess}j} - \left( X_0 + \sum_{i=1}^N X_{1i} \sin(\omega_i t_j) + X_{2i} \cos(\omega_i t_j) \right) \right) \sin(\omega_k t_j) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial X_{2k}} &: \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 2 \left( Y_{\text{mess}j} - \left( X_0 + \sum_{i=1}^N X_{1i} \sin(\omega_i t_j) + X_{2i} \cos(\omega_i t_j) \right) \right) \cos(\omega_k t_j) = 0. \end{aligned}$$

Mit der verkürzenden Schreibweise (Mittelwertbildung)

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_j := \langle a_j \rangle$$



folgt

$$\underline{\underline{A}} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_{11} \\ X_{21} \\ \dots \\ X_{1n} \\ X_{2n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle Y_{\text{mess}j} \rangle \\ \langle Y_{\text{mess}j} \sin(\omega_1 t_j) \rangle \\ \langle Y_{\text{mess}j} \cos(\omega_1 t_j) \rangle \\ \vdots \\ \langle Y_{\text{mess}j} \sin(\omega_N t_j) \rangle \\ \langle Y_{\text{mess}j} \cos(\omega_N t_j) \rangle \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

mit

$$A_{ik} = \langle a_i a_k \rangle \quad (3.56)$$

und

$$a_{2i} := \sin(\omega_i t_j), i = 1, \dots, N \quad (3.57)$$

$$a_{2i+1} := \cos(\omega_i t_j), i = 0, \dots, N \ (\omega_0 = 0). \quad (3.58)$$

Dies führt auf ein lineares Gleichungssystem in  $X_0, X_{1i}, X_{2i}$ . Der Rang der Matrix  $\underline{\underline{A}}$  ist solange  $2N+1$ , wie  $m \geq 2N+1$  ist. Die Amplituden des angepassten Sinus können durch

$$A_i = \sqrt{X_{1i}^2 + X_{2i}^2} \quad (3.59)$$

und die Phasen durch

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{X_{2i}}{X_{1i}}\right) \quad (3.60)$$

bestimmt werden.

Das hier vorgestellte Verfahren ist nicht auf eine äquidistante Abtastung des Signals  $Y_{\text{mess}}$  angewiesen. Sobald die Zeiten  $t_j$  bekannt sind, kann es angewendet werden. Damit wird es möglich, durch andere Verfahren Messausreißer zu eliminieren und trotzdem eine Überlagerung mehrerer Sinusfunktionen zu modellieren. Mit dem hier angegebenen Verfahren kann mittels der Variation der Abtastrate die beste Approximation im Quadratmittel gesucht werden. Die Güte dieser Bestimmung hängt nur von der Länge des untersuchten Zeitabschnitts und der Genauigkeit des erzeugten Sinus ab.

### Analoger Amplituden- und Phasengang

Der Amplituden- und Phasengang am analogen Ausgang eines Sensors wird mit Hilfe des in Abbildung 3.4 gezeigten Aufbaus gemessen. Der verwendete Schlumberger-Solartron-Frequenzgangsanalysator generiert ein Signal<sup>3</sup> (Generator) und misst mittels einer Lock-In-Technik das Verhältnis der Amplituden und die Phase zwischen den beiden Eingangskanälen 1 und 2.

Aus dem Aufbau wird offensichtlich, dass der Analysator die Antwortfunktion des Spulensystems und des Magnetometers gleichzeitig misst, sodass in einem Vorversuch der Einfluss des Spulensystems separat bestimmt werden muss. Sein Einfluss ist zu korrigieren. Aus den gewonnenen Rohdaten können die charakteristischen Parameter des Instruments (Amplitude, Phase, Laufzeit) als Funktion der Frequenz  $f$  gewonnen

<sup>3</sup>In diesem Fall ein monofrequentes Sinussignal in diskreten Frequenzschritten

werden [Rahm 1997a]. Die Laufzeit  $\tau$  als Funktion der Frequenz  $f$  und der Phase  $\Phi$  ergibt sich zu

$$\tau(f, \Phi) = \frac{\Phi}{360^\circ} \frac{1}{f}. \quad (3.61)$$

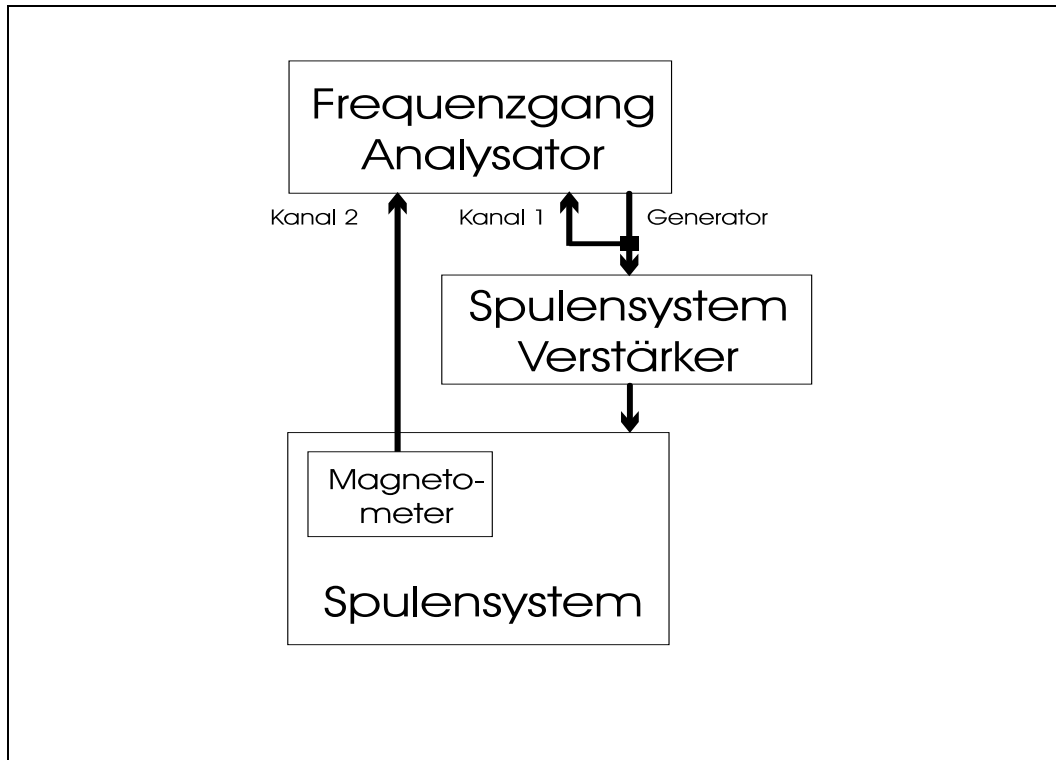


Abbildung 3.4: Versuchsaufbau zur Bestimmung des analogen Amplituden/Phasengangs

#### Bestimmung der Laufzeit am digitalen Ausgang

Die Bestimmung der Laufzeit, d.h. der Zeit, die ein Signal von der Aufnahme des Signals durch den Sensor bis zu seinem Erscheinen am digitalen Ausgang der Elektronik benötigt, kann mit Hilfe eines speziell entwickelten Gerätes dem RaSyGen (Random Sync Generator) erfolgen. Der RaSyGen und seine Funktionsweise ist in der Arbeit von [Henke 1995] beschrieben worden.

In Anlehnung an Verfahren, die beim GPS (Global Positioning System) verwendet werden, erzeugt der RaSyGen Mikroprozessor gesteuert eine feste Zufallssignalfolge, die auf das Spulensystem gegeben werden. Über die Messkette von Spulensystem und dem zu untersuchenden Instrument wird diese Signalfolge als Magnetfeldsignal und gleichzeitig auch direkt aufgezeichnet. Durch Vergleich der aufgezeichneten zwei Zeitreihen lassen sich Aussagen zum Laufzeitverhalten des Instruments und des Gesamtsystems Magnetsrode gewinnen.

#### Verteilung der Werte des abgetasteten Signals

Wird ein ungestörtes magnetisches Gleichfeld eine lange Zeit digital abgetastet, so kann mit Hilfe eines Histogramms die Verteilungsfunktion des abgetasteten Signals bestimmt werden. Damit lässt sich die Statistik der abgetasteten Werte überprüfen. Dieser Test hat aus mehreren Gründen eine wichtige Bedeutung:

- Bei der ermittelten Verteilungsfunktion sollte es sich um eine Normalverteilung handeln. Denn dann und nur dann können die üblicherweise verwendeten statistischen Verfahren exakt angewendet werden. Sollte eine signifikante Abweichung von dieser Norm gefunden werden, so müssen alle weiteren Verarbeitungsschritte der Daten genau überprüft und eventuell an die andere Statistik angepasst werden.
- Mit diesem Verfahren lassen sich bei sehr langsamer Variation des Magnetfeldes (Sinus oder Rampe) die Analog-Digital-Wandler auf fehlende Digitalisierungsschritte überprüfen. Außerdem können sehr leicht Bit-Fehler im AD-Wandler entdeckt werden.

#### Bestimmung der Frequenz der Vektorrates

Zur Bestimmung der Frequenz der Vektorrates des Instruments wird ein bekanntes monofrequentes Sinussignal, wie es z.B. sehr einfach mit einem Funktionsgenerator erzeugt werden kann, vermessen. Die Frequenz der Vektorrates kann grob mit Hilfe einer Fouriertransformation bestimmt werden. Dazu wird das Signal zunächst in den Frequenzraum transformiert. Im Frequenzraum kann durch Variation der Abtastfrequenz das Maximum der Amplitude des bekannten Sinussignals auf den entsprechenden Frequenzkanal verschoben werden.

Dieses Verfahren ist nicht sehr genau. Um eine bessere Auflösung bei einem nicht unbedingt äquidistant abgetasteten Signal zu erhalten, kann das Verfahren aus Abschnitt 3.5.2 verwendet werden: Wird die Frequenz der Abtastung durch Änderung der  $t_j$  variiert, so kann der „Goldene-Schnitt-Algorithmus“ [Bronstein, Semendjajew 1979] (Abschnitt 9.2.2.2.1) zur Bestimmung der „besten“ Abtastfrequenz verwendet werden.

## 3.6 Gleichzeitige Überwachung einer Kalibrierung durch ein zusätzliches Magnetometer

Oft erscheint es wünschenswert, die im Laborsystem erzeugten Felder mit einem zusätzlichen Magnetometer zu überwachen. Hierbei ist die Position, an der das zusätzliche Magnetometer platziert werden soll, sehr sorgfältig auszuwählen, damit das zusätzliche Magnetometer keinen, beziehungsweise einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das zu kalibrierende Instrument ausübt. Die Wechselwirkung zwischen den beiden Magnetometern basiert wesentlich auf dem Einfluss von Streufeldern der Kompensationsspulen aufeinander und ist damit direkt von dem zu kompensierenden Hintergrundfeld abhängig (siehe auch das Beispiel im Abschnitt 6.9).

Das im Folgenden beschriebene Szenario untersucht in einer „worst case“-Abschätzung den Einfluss des „Zopf Mag“ (siehe Abschnitt 4.4.5) in einem Laborsystem auf das Zentrum des Spulensystems. Unter der Annahme, dass das Magnetometer an der Position (45,-2,-47) im Prüfsystemkoordinatensystem platziert ist<sup>4</sup>, ergibt sich die magnetische Beeinflussung  $\underline{b}_{\text{Sto}}$  in Abhängigkeit von  $\underline{b}_{\text{Hintergrund}}$  im Zentrum (0,0,0) zu

$$\underline{b}_{\text{Sto}} = \begin{pmatrix} 7.51 \cdot 10^{-6} & 3.90 \cdot 10^{-6} & 39.29 \cdot 10^{-6} \\ 2.81 \cdot 10^{-6} & 21.14 \cdot 10^{-6} & 4.37 \cdot 10^{-6} \\ 26.43 \cdot 10^{-6} & 3.55 \cdot 10^{-6} & 1.00 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix} \underline{b}_{\text{Hintergrund}}. \quad (3.62)$$

Die hier angegebene Matrix zeigt, dass selbst bei einem Abstand von ca. 65 cm des „Zopf Mags“ vom Zentrum des Spulensystems mit einer Beeinflussung von etwa 2.3 nT bei 60000 nT Hintergrundfeld gerechnet werden muss. Die hier angegebenen Koeffizienten sind natürlich abhängig von der Geometrie des Magnetometersensors und seiner geometrischen Lage in Bezug auf das Zentrum. Daher ist es nicht möglich, diese Koeffizienten zu verallgemeinern. Sie müssen für jeden Aufbau neu berechnet werden.

An der Stelle, an der das „Zopf Mag“ positioniert ist, ergibt sich ein Restfeld von ca. (1067, 16, 2537) nT, verursacht durch die unvollständige Kompensierung außerhalb des homogenen Bereiches des Spulensystems. Gleichzeitig werden nur etwa 94% in der  $U$ - und  $W$ -Richtung und sogar nur 19% in der  $V$ -Richtung des Erdmagnetfeldes kompensiert. Damit prägen sich auch dynamische Erdmagnetfeldschwankungen im „Zopf Mag“ durch.

Die Position des „Zopf Mag“ im Laborsystem stellt somit einen Kompromiss dar, zwischen den Anforderungen des Prüflings, keinerlei Wechselwirkung mit dem „Zopf Mag“ zu haben und der Anforderung der Überwachung des Laborsystems, die eine Positionierung des „Zopf Mags“ möglichst im homogenen Bereich des Laborsystems fordert.

## 3.7 Standardisiertes Verfahren zur Kalibriermessung

Wie in den vorherigen Kapiteln schon deutlich wurde, spielt die Auswahl der Messwerte eine wichtige Rolle bei der Berechnung der Modelle und damit bei der Charakterisierung des Instruments. Aus diesem Grund muss eine Messung sehr sorgfältig geplant werden. Folgende Aspekte spielen dabei eine Rolle:

- Genauigkeit und Ausstattung des Laborsystems,
- Länge des Zeitraums, in dem alle Parameter als stabil betrachtet werden können,
- Auflösungsvermögen und Abtastrate des Instruments,
- Anforderungen an die Genauigkeit der Kalibrierung,
- Kontrolle/Unterdrückung parasitärer Effekte.

---

<sup>4</sup>kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . Alle Positionsangaben in cm.

Unter Berücksichtigung all dieser Faktoren wird das Messprogramm entwickelt. Per definitionem bilden viele Messvektoren die Datenbasis eines Instrumentenmodells. Die Messvektoren ihrerseits werden durch eine Abbildungsvorschrift bzw. durch ein statistisches Verfahren aus den einzelnen Instrumentenvektoren abgeleitet. Sofern nur sehr wenige Messvektoren benötigt werden, können diese „manuell“ mit Hilfe von Multi-meter, Papier und Stift beschafft werden. Für den Fall, dass die Zahl der verwendeten Messvektoren groß wird, ist eine automatische Aufzeichnung der Daten anzustreben. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten gezeigt wurde, genügen 12 Parameter, nämlich drei Empfindlichkeiten, sechs Winkel zur geometrischen Lage und drei Offsets zur Charakterisierung eines Dreiachsensors mittels einer DC-Kalibrierung unter Verwendung eines linearen Modells. Damit reicht die Messung von 4 zueinander linear unabhängigen Messvektoren aus, alle Parameter zu bestimmen<sup>5</sup>. Sind die gemessenen Vektoren allerdings fehlerbehaftet, so prägen sich diese Fehler komplett auf das Modell durch. Deshalb werden weitere Messvektoren ermittelt, durch die die Fehler des Modells verkleinert und das Modell damit besser abgesichert werden kann.

Dabei sollte der zu untersuchende Parameterraum möglichst dicht und gleichmäßig abgetastet werden. An dieser Stelle greifen die Genauigkeit des Spulensystems und die zeitliche Stabilität des Testaufbaus. Verändert sich der Testaufbau während einer Messung, so sind die zu verschiedenen Zeitpunkten gemessenen Messvektoren nicht mehr miteinander vergleichbar. Auf der anderen Seite sollte aber die Ungenauigkeit eines jeden gewonnenen Messvektors so gering wie möglich sein. Da normalerweise eine bessere Absicherung eines Messwertes entweder durch eine sehr lange integrierende Messung oder durch die statistische Betrachtung vieler Instrumentenvektoren erreicht wird, ergibt sich ein Widerspruch zwischen der Zahl der gewonnen Messvektoren und der Messunsicherheit eines einzelnen Vektors.

Dieser Widerspruch lässt sich nicht auflösen, da sowohl die Messzeit als auch die Abtastrate des Instruments begrenzt sind. Ein Kompromiss, der wie folgt aussieht, kann gefunden werden: Sei  $F_{\text{Instr}}$  der Fehler des Instruments und  $F_{\text{Sp}}$  der Fehler des Spulensystems, so kann sicher nur ein Fehler des Instruments verifiziert werden falls  $F_{\text{Instr}} > F_{\text{Sp}}$  ist, da sonst der Fehler des Instruments im Rauschen der Anlage selbst verschwindet. Aus diesem Grund ist die Anforderung an die Genauigkeit eines einzelnen Messvektors nur so groß wie die an den Testaufbau. Für die Zahl der zu benutzenden Instrumentenvektoren können die folgenden Kriterien angegeben werden:

- Unter Benutzung der Formel

$$\Delta x = \pm \sqrt{\frac{[\xi\xi]}{n(n-1)}}, \quad (3.63)$$

mit  $n$  als Zahl der Einzelmessungen und  $[\xi\xi] = \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2$  kann der Fehler  $\Delta x$  eines Mittelwertes  $m$  aus  $n$  Messungen abgeschätzt werden [Joos/Richter 1978].

- Falls die Reihe der Instrumentenvektoren später mit einer FFT (Fast Fourier Transformation) untersucht werden soll, empfiehlt sich für die Zahl der Messvektoren eine 2er Potenz.

---

<sup>5</sup>Drei linear unabhängige Vektoren spannen den Raum auf. Der vierte Vektor z.B. Nullfeld liefert den Offset.

- Die Zahl der Kalibriervektoren sollte deutlich größer als die Zahl der Modellparameter sein, um eine ausreichende Modellsicherheit zu gewährleisten. In Praxis hat sich ein Verhältnis von größer als 10:1 bewährt.
- Die Kalibriervektoren sollten über den Eingabeparameterraum gleichverteilt sein, damit das Modell im „Modellraum“ gleichmäßig gestützt werden kann.
- In Zweifelsfällen oder bei Verdacht eines Messausreißers kann ein Kalibriervektor unberücksichtigt bleiben. Einzelne Vektoren sollten aber nicht korrigiert und weiter benutzt werden, da alle Kalibriervektoren gleich behandelt werden sollten.
- Die maximale Gesamtmesszeit richtet sich nach der Stabilität der Testanlage<sup>6</sup>.
- Die Stabilität der Testanlage sollte bekannt sein und falls möglich gleichzeitig mit der Messung überwacht werden. Dabei spielen die Parameter Nullpunktstabilität der Anlage und die Variation der Temperatur eine wesentliche Rolle.
- Viele Messungen des Nullfeldes helfen bei der Überwachung der Anlage. Sie sollten aber nur zur Korrektur der Messvektoren verwendet werden, da sonst der Nullpunkt des Laborsystems in den Modellen überbewertet wird.
- Der Gültigkeitsbereich eines Kalibriermodells gerade bei nichtlinearen Modellen sollte durch viele Messvektoren auf dem Rand dieses Gebietes abgesichert werden. Eine Interpolation zwischen den Rändern ist eher möglich als eine Extrapolation außerhalb dieses Gebietes.
- Die Bandbreite des zu kalibrierenden Instruments muss berücksichtigt werden, da sonst hohe Frequenzen in den Bildbereich des Instruments hineingefaltet werden und das Signal des Instruments verfälschen (Aliasing).
- Falls möglich sollte die Abtastrate des Instruments so gewählt werden, dass technische Störungen, die über die Stromversorgung (Netzfrequenz 50 Hz) in das Laborsystem gelangen, unterdrückt werden.
- Um mögliche Umwelteinflüsse in der Anlage von Effekten des zu untersuchenden Instruments trennen zu können, sollte ein zweites unabhängig messendes Magnetometer zur gleichen Zeit in der Nähe des zu untersuchenden Instruments betrieben werden.
- Falls notwendig kann die Auflösung des Instruments während der Kalibrierung durch die Addition eines niederfrequenten Signals bekannter Signalform erhöht werden<sup>7</sup> (Maximalfrequenz des Kunstsignals sollte deutlich kleiner als die halbe Nyquistfrequenz sein.).

---

<sup>6</sup>Hierzu gehört auch die Fähigkeit der Testanlage, die periodische Variation des Erdmagnetfeldes an magnetisch ruhigen und stürmischen Tagen zu kompensieren.

<sup>7</sup>Durch die Überlagerung z.B. eines Sinus bekannter Frequenz mit einer Amplitude größer als 10 Digitalisierschritte des Instruments müssen alle entsprechenden Digitalisierschritte nach der Wandlung im Instrument erscheinen. Mit dem Wissen um die Frequenz des Sinus kann dann der DC-Anteil des Signals mit dem Verfahren aus Abschnitt 3.5.2 bestimmt werden.

Werden alle Kriterien berücksichtigt, so empfiehlt sich der folgende Ablauf einer Kalibrierung:

1. Kontrolle des Erdmagnetfeldes,
2. Funktionalitätsüberprüfung des Instruments,
3. Untersuchung zum „Rauschverhalten“ des Instruments,
4. Bestimmung der Vektorrates,
5. Offsetbestimmung,
6. Bestimmung von Amplituden und Phasengang (AC-Parameter),
7. DC Kalibrierung,
8. Temperatur.

Zur weiteren Illustration sind auf den folgenden Seiten beispielhaft die Ergebnisse einer Kalibrierung dokumentiert.

#### 3.7.1 Technische Daten

Bei dem zu kalibrierenden Instrument handelt es sich um ein CLUSTER1-Magnetometer, das als Ersatzeinheit vorgesehen war, und nun als Ersatzeinheit für die CLUSTER2-Mission verwendet wird. Die Kalibriermessungen haben vom 18.11.–12.12.1996 in „Magnetsrode“ stattgefunden. Aus der Vielzahl der möglichen Messbereiche der zwei Sensoren des Experiments wird hier der Messbereich „Range 5“ des „Outboard“-Sensors im Telemetriemode D.

In diesem Bereich werden Magnetfelder von  $\pm 4096$  nT bei einer nominalen Vektorrates von 67.268 Hz mittels eines ADC und einer Datenverarbeitung im Experiment selbst auf ein 14 Bit Wort abgebildet. Die nominale Auflösung beträgt damit 0.5 nT. Von den zwei vorhandenen Analog-Digital-Wandlern wird der sogenannte ADC1 verwendet. Im Vorfeld sind bereits folgende Fakten über das Instrument bekannt:

- Auf der digitalen Signalstrecke ist das zeitliche Verhalten des gemessenen Magnetfeldsignals deterministisch.
- Um den Einfluss der Temperatur auf das Instrument zu untersuchen, steht nur etwa eine Woche zu Verfügung. Dies hat zur Folge, dass nur insgesamt 2 Temperaturzyklen von  $-50$  bis  $+65$  Grad Celsius vermessen werden können. Auf Grund der fünf Messbereiche und der zwei Sensoren, die zwar gleichzeitig den Temperaturen ausgesetzt werden, wobei aber nur jeweils Daten von einem Sensor zur Zeit genommen werden können, ist eine Vermessung der Parameter eines Sensors im gleichen Messbereich nur alle zwei Stunden zu erwarten.
- Ein Messprotokoll liegt als Dokument PH-IGM-TR-003 1/1 [Rahm 1997a] vor.

### 3.7.2 Visuelle Sichtung der Daten

Mittels der visuellen Sichtung der Daten wird zunächst nach fehlenden Blöcken in der Telemetrie gesucht. Besonders geeignet für solche Untersuchungen sind Messungen, bei denen dem DC-Signal ein weiteres AC-Signal der Anlage überlagert ist. Fehlen einzelne Vektoren oder sogar ganze Vektorblöcke, so ist dies in einem AC-Signal sofort erkennbar, da „Sprünge“ beziehungsweise Stufen im Signal entstehen. Abbildung 3.5 zeigt einen Fall, in dem einzelne Datenblöcke verloren gehen.

Damit wird deutlich, dass zu jedem Zeitpunkt der Messungen damit gerechnet werden

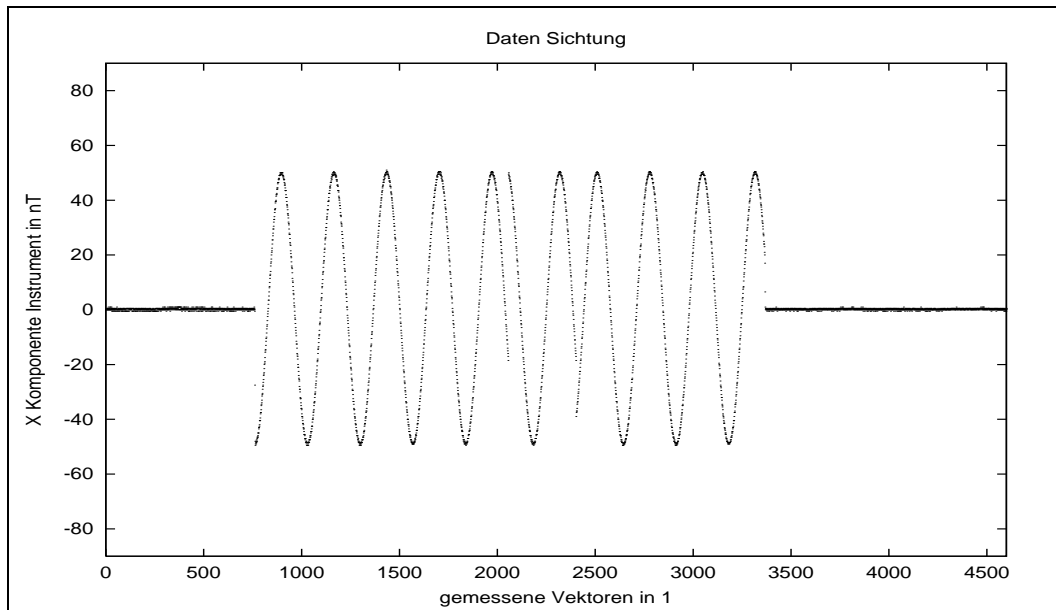


Abbildung 3.5: Datensichtung: Fehlende Telemetrieblöcke in den Daten

muss, dass einzelne Datenblöcke des Instruments verloren gehen. Über den Mechanismus, der dies Verhalten verursacht, kann an dieser Stelle keine endgültige Aussage getroffen werden. Entweder gehen die Datenblöcke bereits im Experiment oder auf dem weiteren Weg bis zur Speicherung in der CCD-Datei verloren. Für die weitere Kalibrierung ergeben sich in soweit keine Auswirkungen, als davon ausgegangen werden kann, dass der Verlust eines Datenblocks ein sehr seltenes Ereignis ist. Somit steht immer noch genügend ungestörtes Datenmaterial zur Bestimmung der Parameter des Instruments zur Verfügung.



### 3.7.3 Auswertung „Ali“-Messung

Zur Bestimmung der Lage des Instruments zum Spulensystem im magnetischen Koordinatensystem wurde die sogenannte „Ali“-Messung entwickelt (siehe auch Abschnitt 3.3.3). Bei einer „Ali“-Messung werden DC-Felder in der folgenden Sequenz geschaltet und mit dem Instrument vermessen:

Nullfeld, Feld in  $+U$ , Feld in  $-U$ , Feld in  $+V$ , Feld in  $-V$ , Feld in  $+W$ , Feld in  $-W$ , Nullfeld. Abbildung 3.6 zeigt eine „Ali“-Messung aus Sicht des Instruments. In der  $X$ -Achse des Plots ist die Vektornummer aufgetragen. In der  $Y$ -Achse, die gesampelten Rohdaten des Instruments in nominalen nT.

Mit dem Wissen der Abfolge der Felder lässt sich sofort die Matrix  $\underline{\underline{D}}$  angeben, die die Felder des Spulensystems in die gemessenen Felder des Instruments überführt.

$$\underline{b}_{\text{Instr}} = \underline{\underline{D}} \underline{b}_{\text{Labor}} = \begin{pmatrix} 0.0 & -1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{pmatrix} \underline{b}_{\text{Labor}}$$

Unter Berücksichtigung der Abtastrate des Instruments bei etwa 67 Hz werden die Parameter des Vorhersagefilters (aus Abschnitt 2.5.1) ermittelt. Gewählt werden für die Länge des Kurzzeitbuffers 30 Vektoren (ca. 0.5 s Länge) und für den Langzeitbuffer 150 Vektoren (ca. 2.5 s Länge). Wird der Filter mit diesen Einstellungen auf die „Ali“-Messung (Abbildung 3.6) angewendet, so ergibt sich das in Abbildung 3.7 gezeigte Bild. Nach einer kurzen Einschwingzeit (150 Vektoren) zum erstmaligen Auffüllen der beiden Buffer entsteht zunächst ein erster Überschwinger, der aus der abrupten Änderung des Erwartungswertes resultiert. Jeder weitere Sprung in den Feldwerten wird im Anschluss von zumindest einer Komponente detektiert.

Aus dieser Abbildung lassen sich 1.8 für den Detektionsschwellwert und 1.0 für den Aktivierungsschwellwert ablesen. Um für die Auswahl des Datenbereiches sicher aus den durch den Sprung gestörten Zeitbereich zu gelangen, wird der Bereich von -306 bis -50 Vektoren ausgewählt. Die so ausgewählten Bereiche sind in Abbildung 3.8 dargestellt.

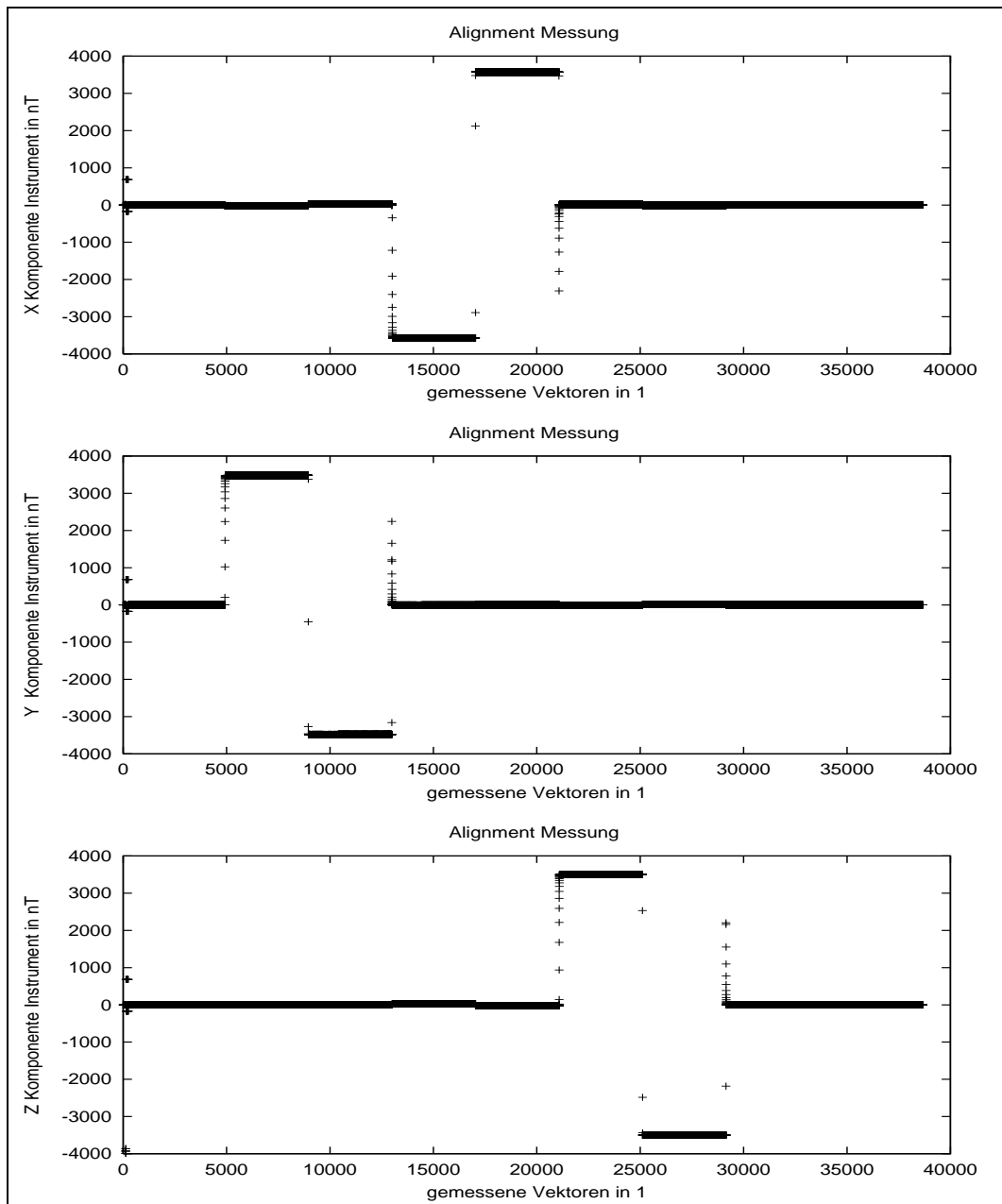


Abbildung 3.6: “Ali”-Messung: Rohdaten des Instruments

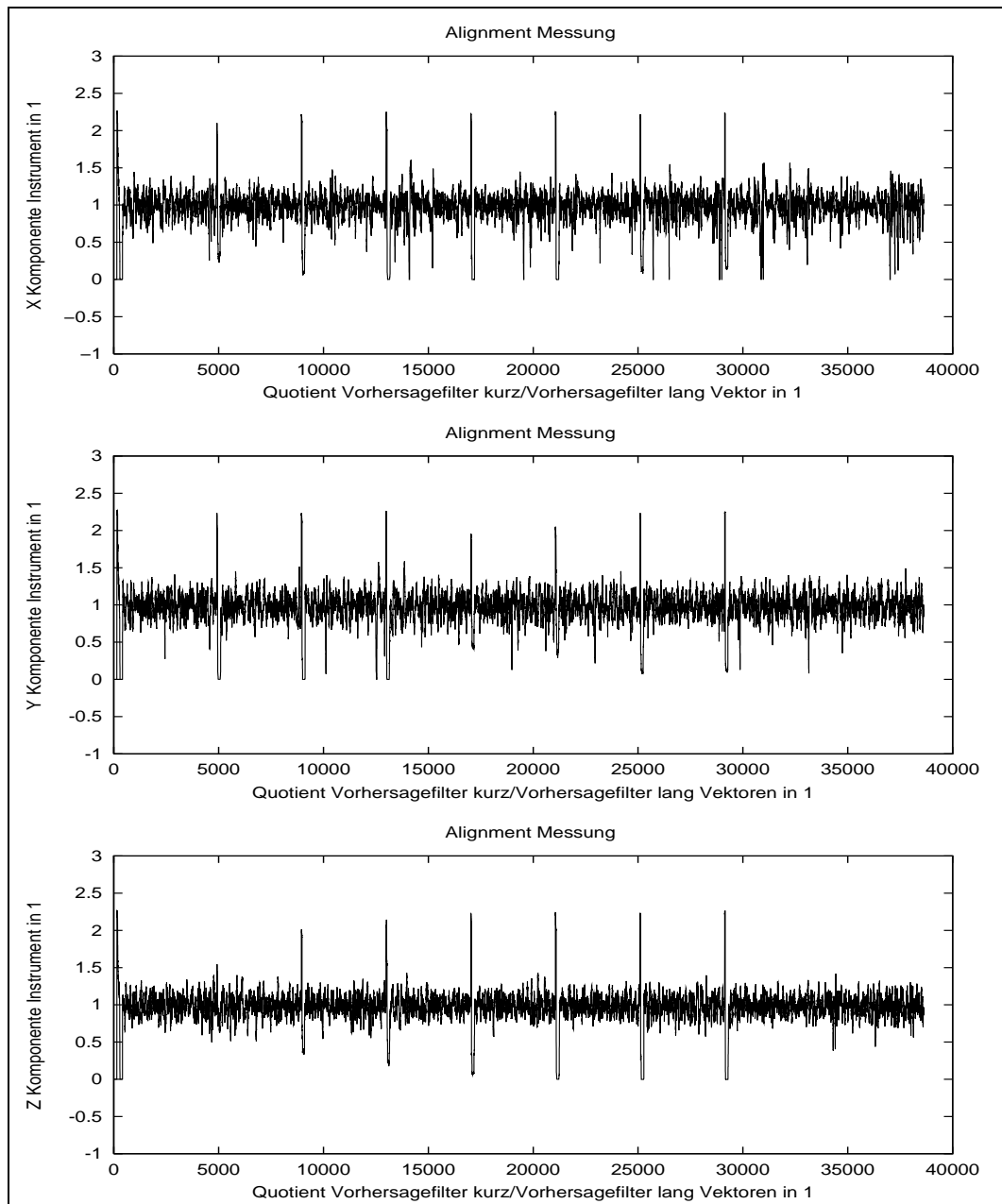


Abbildung 3.7: „Ali“-Messung: Detektierte Sprünge

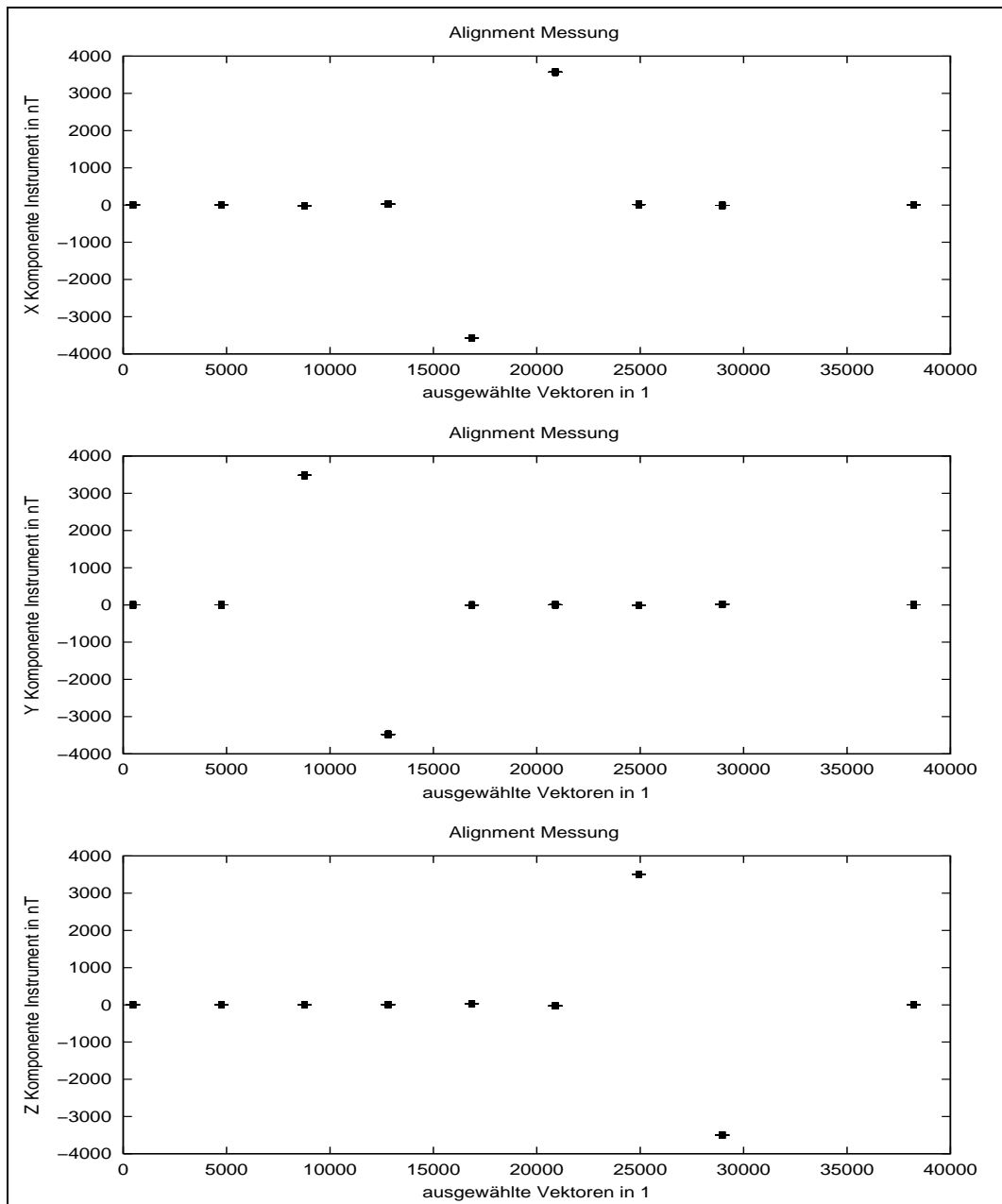


Abbildung 3.8: „Ali“-Messung: Ausgewählte Bereiche

### 3.7.4 Spike–Sphere–Messungen

Abbildung 3.9 zeigt die von Instrument aufgezeichneten Daten einer Spike–Sphere–Messung. Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, wie eine Spike–Sphere–Messung aufgebaut ist. Die hier gezeigte Messung besteht aus 320 Messschritten von jeweils 45 s Dauer. Um eine Anschauung von der Feldverteilung zu gewinnen, stelle man sich eine Kugel im Magnetfeldraum mit ca. 4000 nT Radius vor. Auf der Oberfläche dieser Kugel werden zunächst auf einem Großkreis entlang dem Äquator Felder erzeugt. Nach ca. 1800 s ist dieser Abschnitt beendet.

Es folgen weitere Abschnitte mit Messungen auf den Breitengraden  $\pm 30$  Grad,  $\pm 60$  Grad sowie zwei Messungen bei  $\pm 90$  Grad. Die gesamte Messung über diese Kugelschale dauert etwa 7200 s. In der zweiten Hälfte der Messung folgen weitere Messschritte, die die Kugel im Inneren gleichmäßig mit Feldern überdecken.

Zur Kontrolle des Offsets des Instruments und des Restfeldes des Referenzsystems wird zusätzlich nach Umlauf eines Breitengrades sowie am Anfang und am Ende der Messung ein Nullfeld erzeugt. Die gemessenen Daten werden mit dem Verfahren aus 2.5 verarbeitet. Hierzu werden die Parameter aus Tabelle 3.1 verwendet. Die Abbil-

Schritt 1	Länge Kurzzeitbuffer:	30
	Länge Langzeitbuffer:	150
	Detektions Schwellwert:	1.80000
	Aktivierungs Schwellwert:	1.00000
	Startvektor:	-306
	Endvektor:	-50
Schritt 2	Kalibrierschrittbereich:	-5 – 0
Schritt 3–5	Bildung von Mittelwerten	
Schritt 6	Standardabweichung $x,y,z$	$\leq 3.0$
	Nur der jeweils letzte Datensatz eines Kalibrierschrittes wird verwendet.	

Tabelle 3.1: Verwendete Parameter

dungen 3.10 und 3.11 zeigen nacheinander das Ergebnis nach der Verarbeitung der Rohdaten und die Residuen, die sich nach der Anpassung des besten Modells ergeben. Die ermittelten Parameter werden schließlich in Tabelle 3.2 in einem Protokoll zusammengefasst.

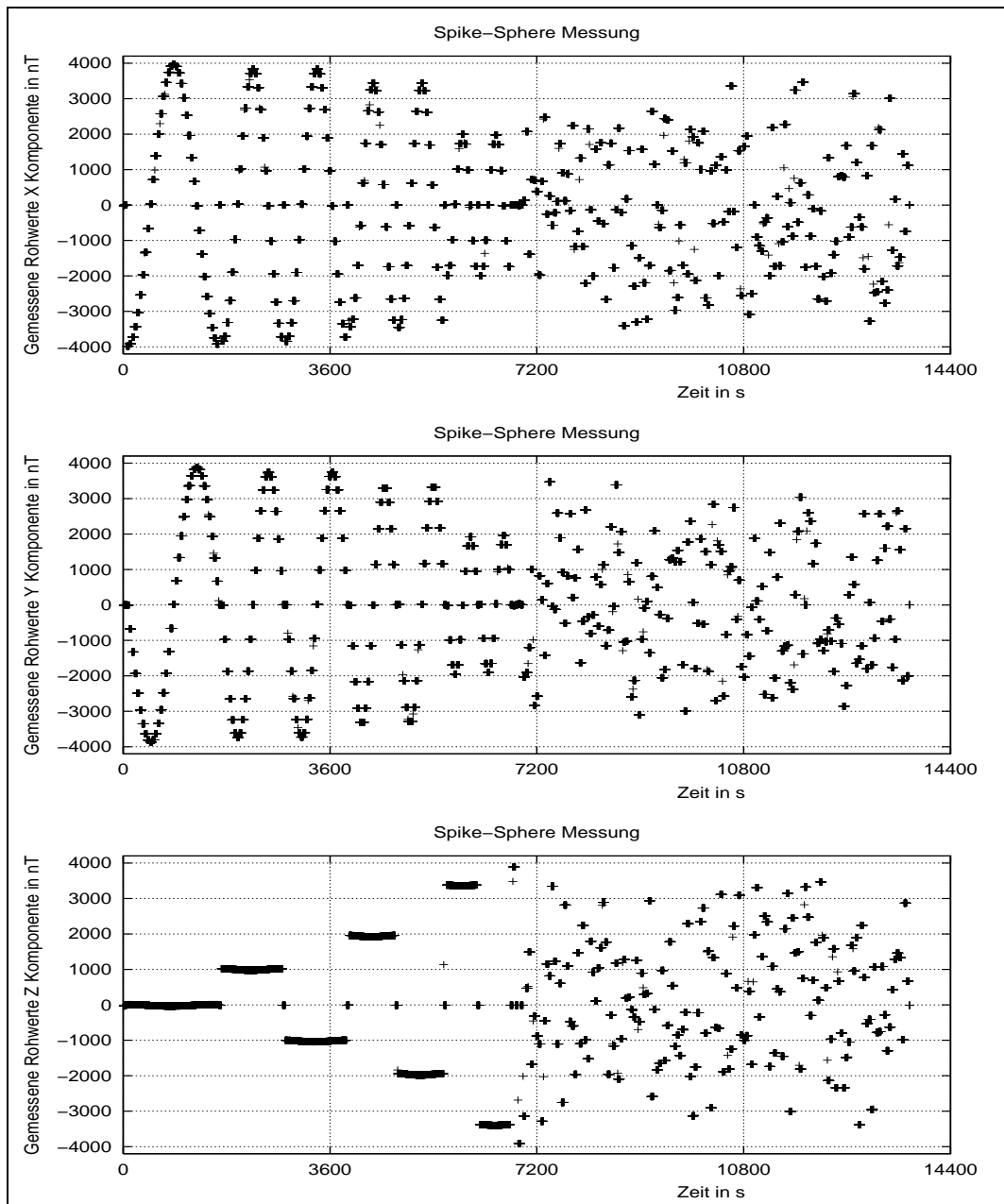


Abbildung 3.9: Spike-Sphere-Messung: Rohdaten des Instruments

### 3.7 Standardisiertes Verfahren zur Kalibriermessung

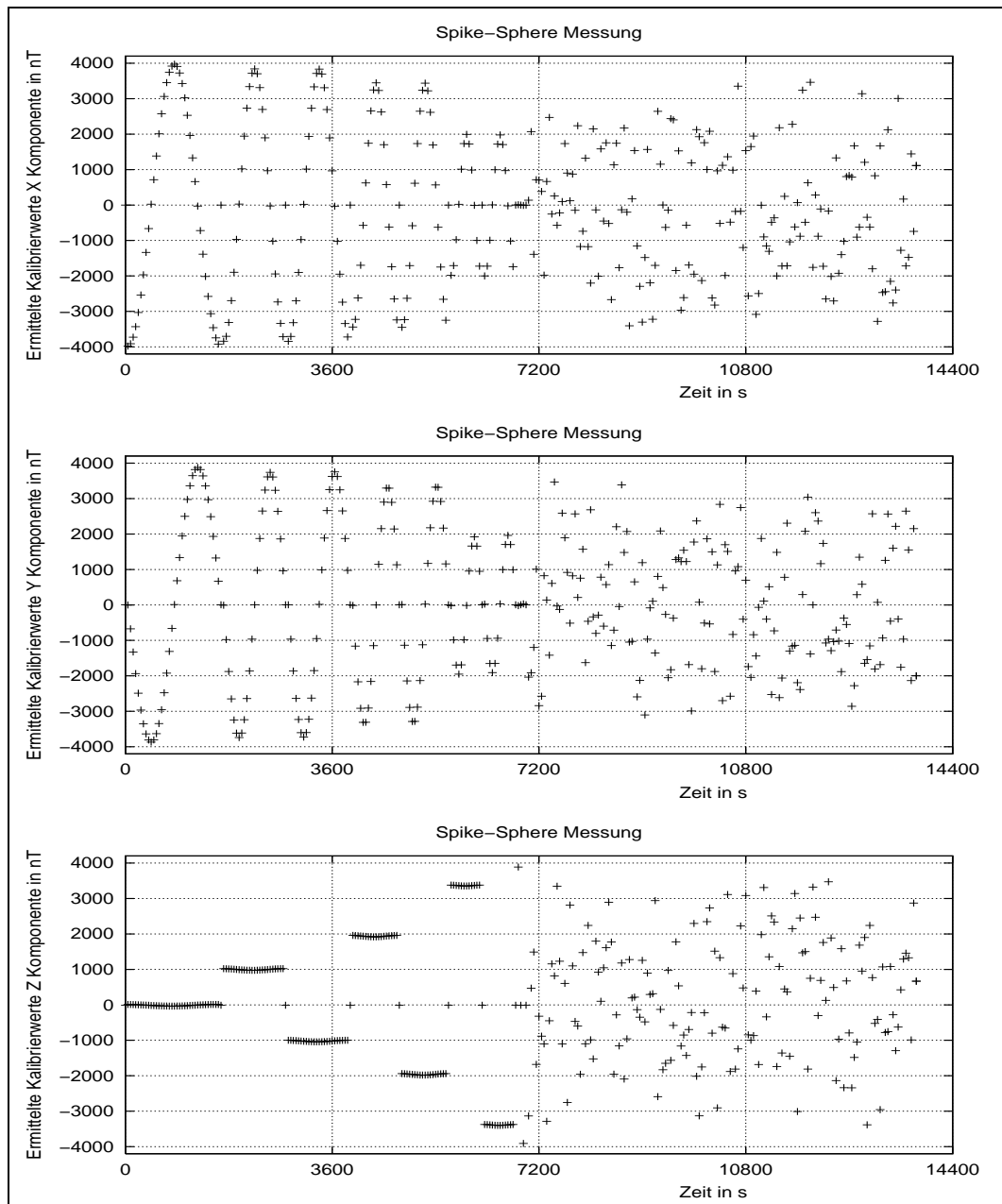


Abbildung 3.10: Spike-Sphere-Messung: Kalibriervektoren des Instruments

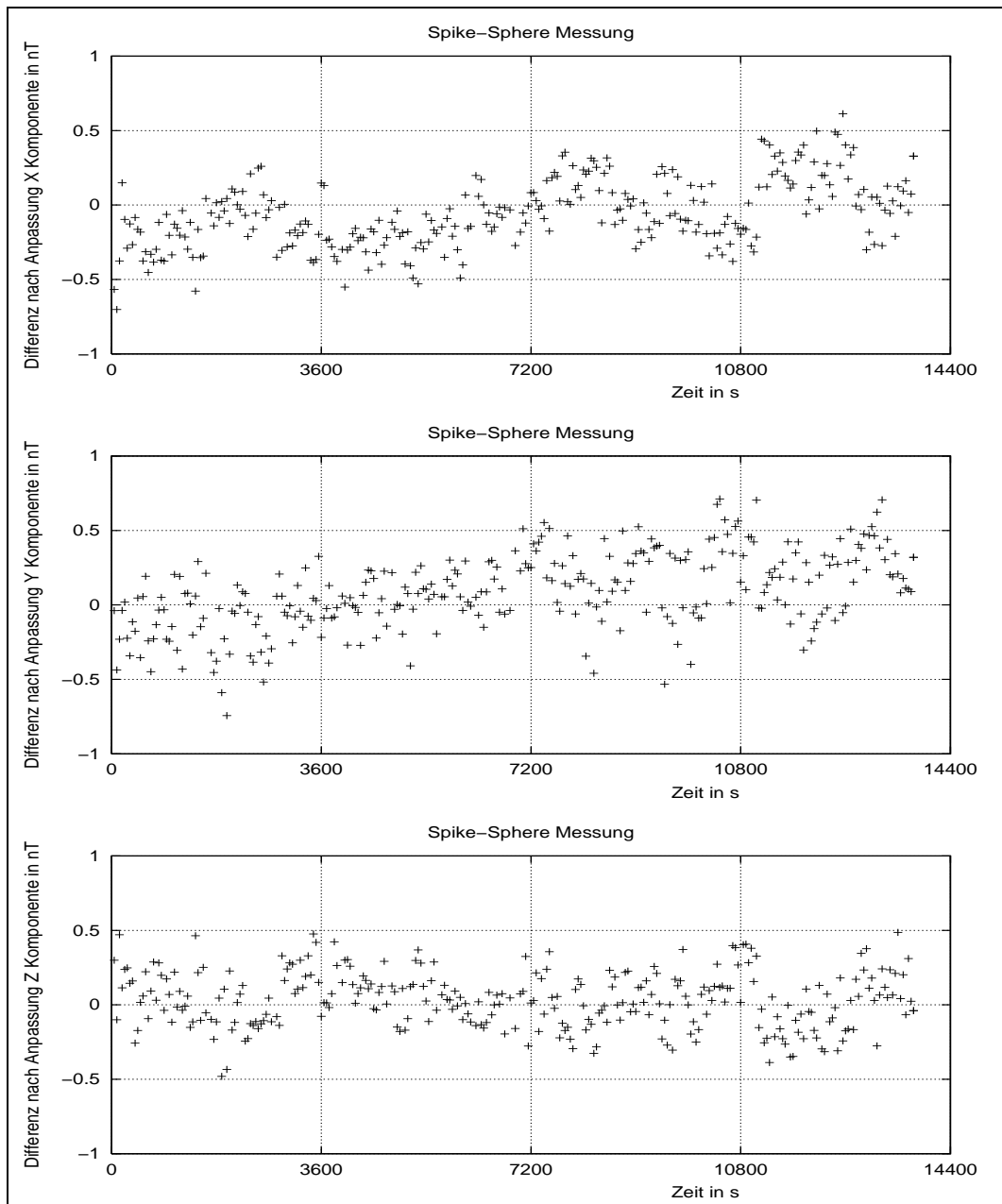


Abbildung 3.11: Spike-Sphere-Messung: Restfelder nach Anpassung



### 3.7 Standardisiertes Verfahren zur Kalibriermessung

Ergebnisprotokoll Blatt (Global Modus)

```

Programm      : kalt.exe Version 5.0
Eingabedatei: o:\FGM\A\PH\o\1\r5\b\s\d11-29\015BS001.AUT
Kommentar     : Phoenix 0B ADC1 Rg5 Brst SPH
Datum         : 29/11
Zeit          : 00:27:37 - 04:17:06
Anlagen Parameter:
Lage Matrix   : +1.0000000 +0.0000000 +0.0000000
                +0.0000000 +1.0000000 +0.0000000
                +0.0000000 +0.0000000 +1.0000000
Offset [nT]   : +0.0000000 +0.0000000 +0.0000000

Qualitaet der Eingabedaten:
Mittlere Temp. (T): +13.716 [deg C]
Mittl. Stdab. xp [nT]:+0.427   yp [nT]:+0.364   zp [nT]:+0.282   T [C]:+0.007

Uebertragungsmatrix      (M^(-1)) Probe (p) -> Anlage (f)

Parameter   ^1[1]      ^2[nT^-1]      ^3[nT^-2]      ^4[nT^-3]      ^5[nT^-4]
m1,1        0.98087      -----      -----      -----      -----
m1,2        0.0071312      -----      -----      -----      -----
m1,3       -0.0024338      -----      -----      -----      -----
m2,1       -0.0017336      -----      -----      -----      -----
m2,2        1.0071        -----      -----      -----      -----
m2,3        0.0063363      -----      -----      -----      -----
m3,1        0.0058485      -----      -----      -----      -----
m3,2       -0.00075537      -----      -----      -----      -----
m3,3        1.0001        -----      -----      -----      -----
                ^0[nT]      Tx[C^-1]      Ty[C^-1]      Tz[C^-1]
xp           -----      -----      -----      -----
yp           -----      -----      -----      -----
zp           -----      -----      -----      -----

Berechnete Instrumentenparameter basierend auf linearen Parametern m^1 of M^-1:
Sensorparameter:
Schiefst. [deg,',''] x,y: 89,40,58.7 x,z: 89,48,26.8 y,z: 89,41, 0.2
Empfindl. [1]      x: 0.980901521 y: 1.007162888 z: 1.000147480

Statische Lage      xf      yf      zf
xp [deg,','']      0,25,47.0      90,24,20.1      89,51,28.8
yp [deg,','']      89,53,47.7      0,22,37.9      90,21,45.9
zp [deg,','']      90,20,29.6      89,57,16.6      0,20,40.4

Trennung von M^-1 = R^-10^-1S^-1
Empfindlich.(S^-1):      Orthogonalisierung (O^-1):
0.9809      0      0      1      0.0055331      0.0033608
0      1.0072      0      0      0.99998      0.0055073
0      0      1.0001      0      0      0.99998

Rotation (R^-1):
0.99997      -0.001543      -0.0058028      Rot. um X Achse : 0, 2,41.5
-0.0017673      0.99999      0.00083399      Rot. um Y Achse : 0,20,29.8
0.0059623      0.0007922      0.99999      Rot. um Z Achse : 0, 6, 4.5

Determinante (R^-1): 1

Qualitaet der Anp.:      Xp      Yp      Zp
Residuum Min [nT]: -6.912e-01      -7.511e-01      -4.798e-01
Max [nT]: +6.012e-01      +7.180e-01      +4.870e-01
Mittel [nT]: -5.524e-02      +9.178e-02      +3.429e-02
Std [nT]: +2.227e-01      +2.579e-01      +1.857e-01

```

Tabelle 3.2: Resultat der Anpassung

#### 3.7.5 Offsetbestimmung

Zur Offsetbestimmung wird das in Abschnitt 3.4.2 vorgestellte Verfahren verwendet. Der Sensor wird für jede Komponente einzeln im Nullfeld des Referenzsystems um sich selbst um 180 Grad gedreht. Dabei muss die gerade untersuchte Komponente des Sensors am gleichen geometrischen Ort des Referenzsystems positioniert werden. Tabelle 3.3 zeigt das Resultat der Offsetvermessung.

Ergebnisprotokoll Blatt (Offset Modus)

```

Programm      : kalt.exe Version 2.99a
Eingabedatei: o:\fgm\ph\o\1\r5\n\o\d11-20\015N0001.aut
Kommentar     : Phoenix 0B ADC1 Rg5 Nrml Offset
Anlagenparameter:
Lage Matrix   : +1.0000000 +0.0000000 +0.0000000
                +0.0000000 +1.0000000 +0.0000000
                +0.0000000 +0.0000000 +1.0000000
Offset        : +0.0000000 +0.0000000 +0.0000000

Datum         : 20/11
Zeit          : 09:12:11 - 10:49:23
Qualitaet der Eingabe Daten:
Mittlere Temperatur : n/a
                Xc      Yc      Zc      T
Mittlere Stdabw.: +0.170 +0.253 +0.170 n/a

```

```

Resultat:
Offset      Restfeld
X          +3.16e+00    +1.59e-01
Y          +1.19e+00    -1.23e-01
Z          +5.82e-01    -5.08e-01

```

Tabelle 3.3: Resultat der Offsetmessung

#### 3.7.6 Untersuchung zum Verhalten des Sensors bei unterschiedlichen Temperaturen

Bereits in Abschnitt 3.5.1 wurde der Einfluss der Temperatur auf den Sensor angesprochen. Um eine genauere Untersuchung eines Dreiachssensors bei verschiedenen Temperaturen zu erhalten, wird der Dreiachssensor in eine Temperaturbox gebracht, um ihn von seiner weiteren Umgebung, dem Referenzsystem, thermisch zu isolieren. Die Temperaturbox wird im Inneren elektrisch beheizt oder z.B. mit Trockeneis oder flüssigem Stickstoff gekühlt. Die elektrische Beheizung erfolgt immer zu Zeiten, in denen das Magnetfeld geschaltet wird oder keine Messwerte aufgenommen werden, um die Messungen des Sensors nicht zu verfälschen. Für die Auswertung der Messdaten genügt diesbezüglich das Wissen, dass Bereiche von bis zu 20 s Anlegen eines neuen Feldes für die Auswertung nicht verwendet werden können.

Da eine Bewegung des Sensors innerhalb der Temperaturbox nicht ausgeschlossen werden kann<sup>8</sup>, werden „Ali“-Messungen durchgeführt. Aus jeder dieser „Ali“-Messungen

<sup>8</sup>Mechanische Bewegung des Sensorkörpers verursacht thermische Verspannungen des Materials in der Temperaturbox.

kann ein Modell des Instruments gewonnen werden<sup>9</sup>. Gleichzeitig wird überprüft, ob sich die Temperatur während einer „Ali“-Messung nur in einem gewissen Rahmen ändert; sich der Sensor also im thermischen Gleichgewicht befindet. Bei zu großer Variation der Temperatur wird das berechnete Modell verworfen und für weitere Berechnungen nicht berücksichtigt.

Abbildung 3.12 zeigt einen Ausschnitt der Temperaturmessung–Auswertung. Im untersten Diagramm ist der Verlauf der Temperatur über der Zeit aufgetragen. Der Zeitraum der Messungen umfasst etwa 2.5 Tage. In dieser Zeit wurden 36 Messungen durchgeführt. Oben in Abbildung 3.12 ist der Verlauf des vom Instrument gemessenen Nullfeldes über der Zeit aufgetragen. Zur Kontrolle der Stabilität des Referenzsystems registriert die komplette Zeit ein Magnetometer außerhalb der Temperaturbox ebenfalls das Magnetfeld.

Bei dieser Messung zeigt sich, dass der Offset zwar mit der Zeit variiert, aber unabhängig von der Variation der Temperatur innerhalb der Box zu sein scheint. Weitere interessante Aspekte zeigen sich, wenn die Empfindlichkeit der Sensorkomponenten über der Temperatur dargestellt werden (Abbildung 3.13). Mit steigender Temperatur sinkt die Empfindlichkeit jeder Sensorkomponente<sup>10</sup>. Eine über der Temperatur korrelierte Gerade ergibt eine Steigung von  $1.5 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ . Ein ganz ähnliches Bild einer linearen Abhängigkeit zeigt sich bei Auftragung der Schiefwinkligkeit der Sensorachsen zu einander über der Temperatur (Abbildung 3.14).

Betrachtet man zuletzt noch die Rotationswinkel der Eulerdrehung über der Zeit (Abbildung 3.15), so wird deutlich, dass sich der Sensor mit Änderung der Temperatur bewegt. Gerade diese Bewegung der magnetischen Achsen des Instruments ist im Verlauf der Messung nicht direkt beobachtbar, da das Instrument zur thermischen Isolation in eine fensterlose Temperaturbox gebracht wird und deshalb während der Untersuchung nicht direkt beobachtet werden kann. Tabelle 3.4 fasst alle ermittelten Parameter der Temperatúrauswertung zusammen.

---

<sup>9</sup>Dieses Verfahren ist nur möglich, da im Vorfeld (Spike–Sphere–Messung) geklärt ist, dass ein lineares Modell den Sensor bei einer konstanten Temperatur beschreibt.

<sup>10</sup>Eine Erklärung erfolgt über die Ausdehnung der Spulen durch eine Temperaturerhöhung.

### 3 Verfahren und Auswertetechniken

#### Ergebnisprotokoll Blatt (Temperatur)

Programm : merf.exe Version 5.0  
Eingabedateien : o:\FGM\A\PH\o\1\r5\b\t\all\all.kas  
Comment :  
Datum : 29/11 - 01/12  
Zeit : 14:33:08 - 23:13:02  
Temperatur : 18 - 64  
Std Temp. : 0 - 1.2  
Std Temp. mittel : 0.37  
Std Temp. std. : 0.36

#### Ergebnisse:

Verwendete Messungen : 35 von 36

	Offset [1]	Steigung[1/C]	Korrelationskoe. [1]
Empfindlichk. X [1]:	0.98271	-0.00014056	-0.67905
Empfindlichk. Y [1]:	1.0097	-0.00015446	-0.74089
Empfindlichk. Z [1]:	1.0025	-0.00014063	-0.62763
	Offset [']	Steigung[1/C]	Korrelationskoe. [1]
Schiefstell. XY [']:	-18.476	0.16564	0.99663
Schiefstell. XZ [']:	-14.26	-0.013678	-0.40321
Schiefstell. YZ [']:	-18.786	-0.09335	-0.98469

#### Statistische Parameter:

	Min	Max	Mittel	Std
Empfindlichk. X [1]:	0.97218	0.98958	0.97711	0.0035419
Empfindlichk. Y [1]:	0.99876	1.0149	1.0036	0.0035674
Empfindlichk. Z [1]:	0.99221	1.0118	0.99689	0.003834
Schiefstell. XY [']:	-15.63	-8.0387	-11.873	2.8439
Schiefstell. XZ [']:	-16.328	-13.55	-14.805	0.58049
Schiefstell. YZ [']:	-24.753	-20.336	-22.508	1.6222

Tabelle 3.4: Resultat der Temperatúrauswertung

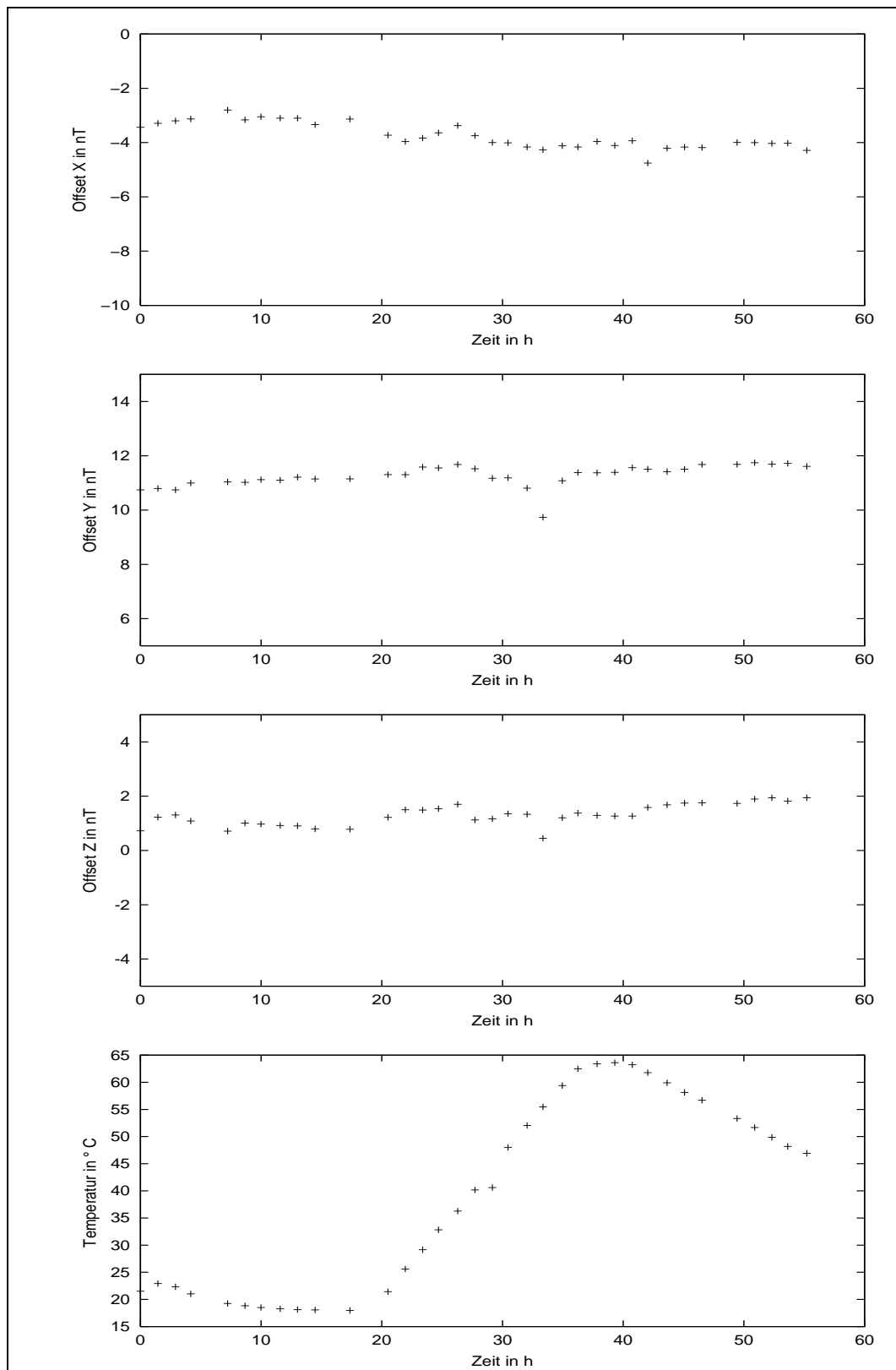


Abbildung 3.12: Nullfeld des Instruments über der Zeit bei Variation der Temperatur

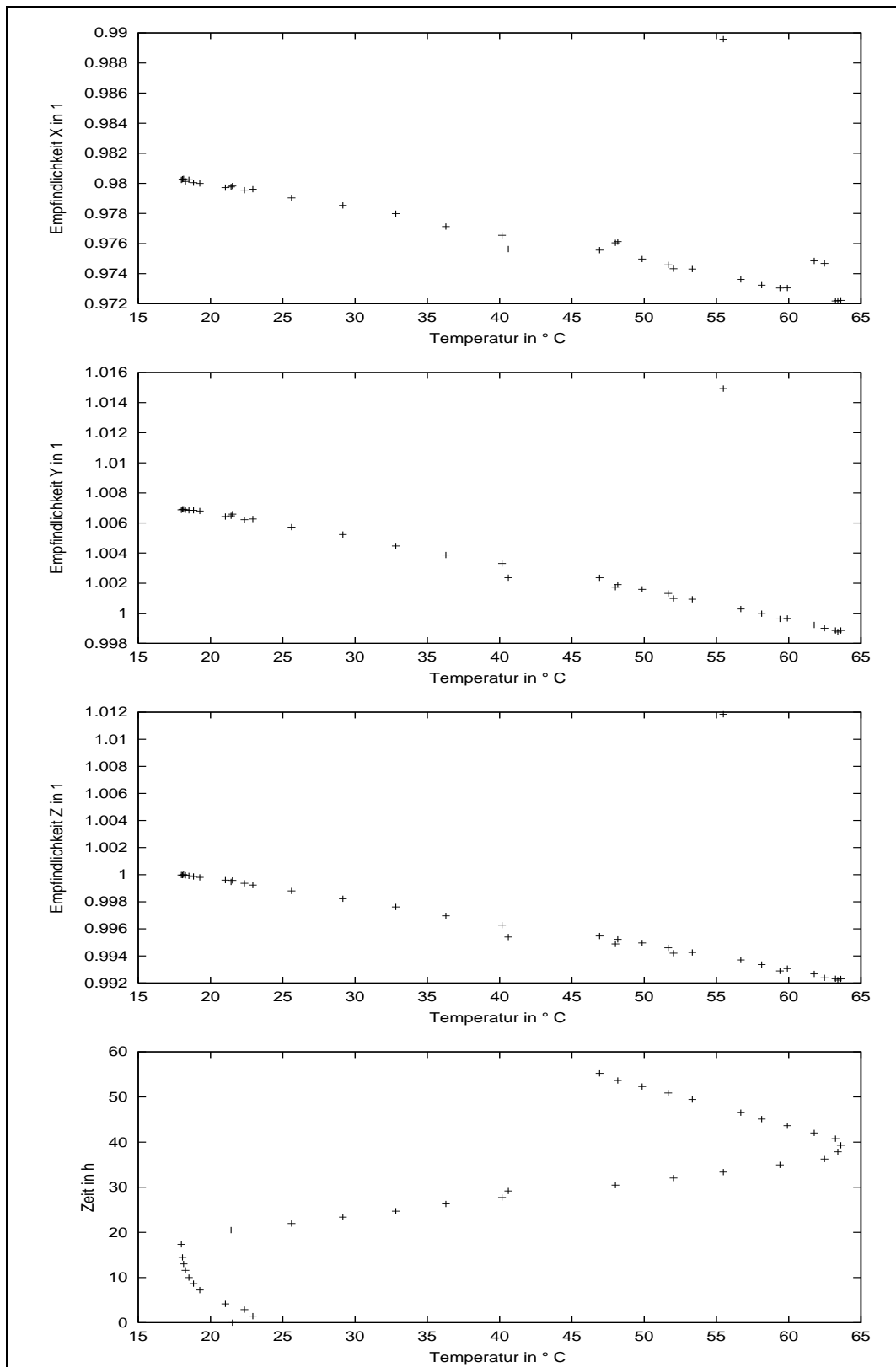


Abbildung 3.13: Ermittelte Empfindlichkeiten der Sensorkomponenten über der Temperatur

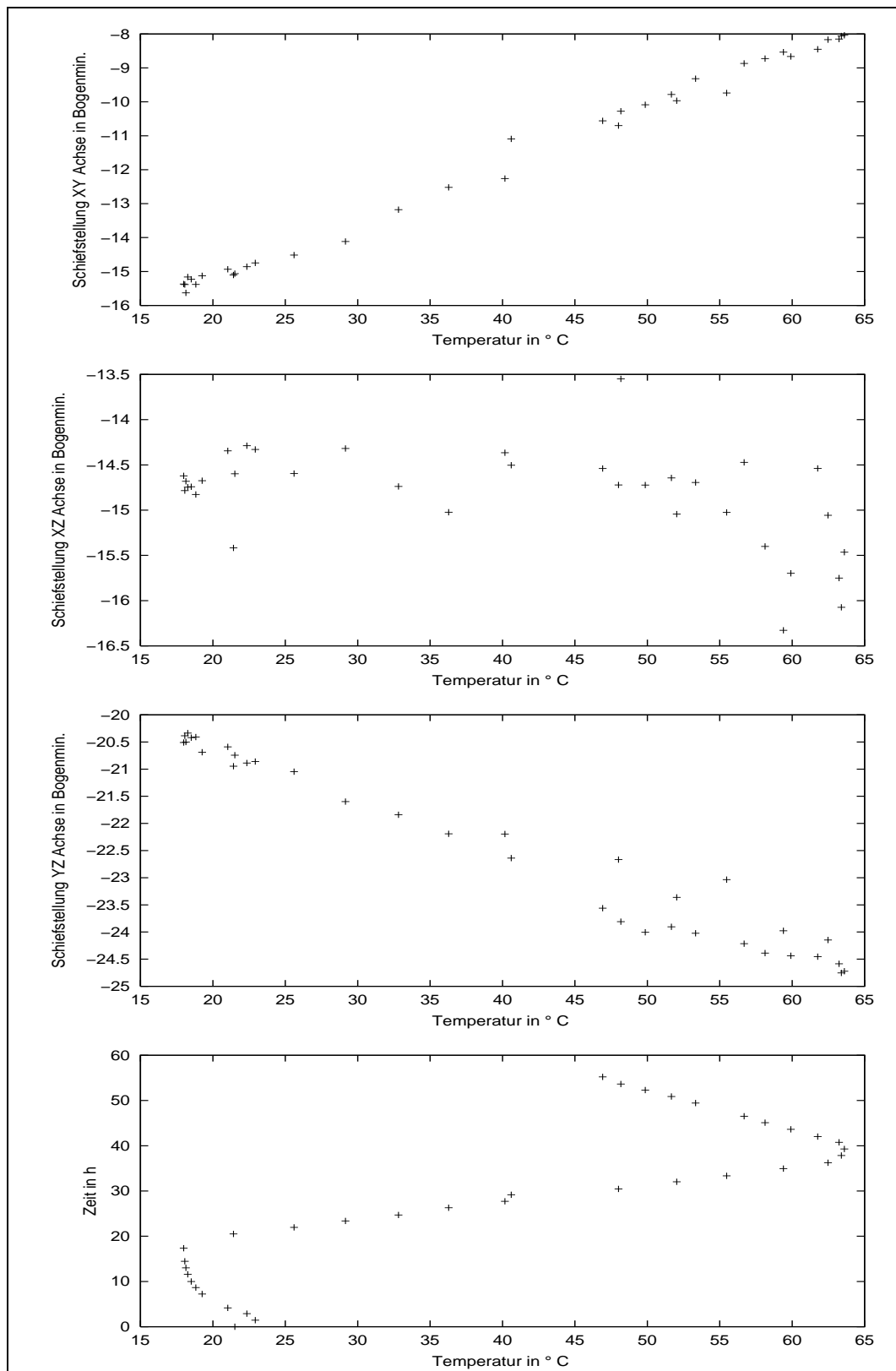


Abbildung 3.14: Ermittelte Schiefstellung der Sensorkomponenten über der Temperatur

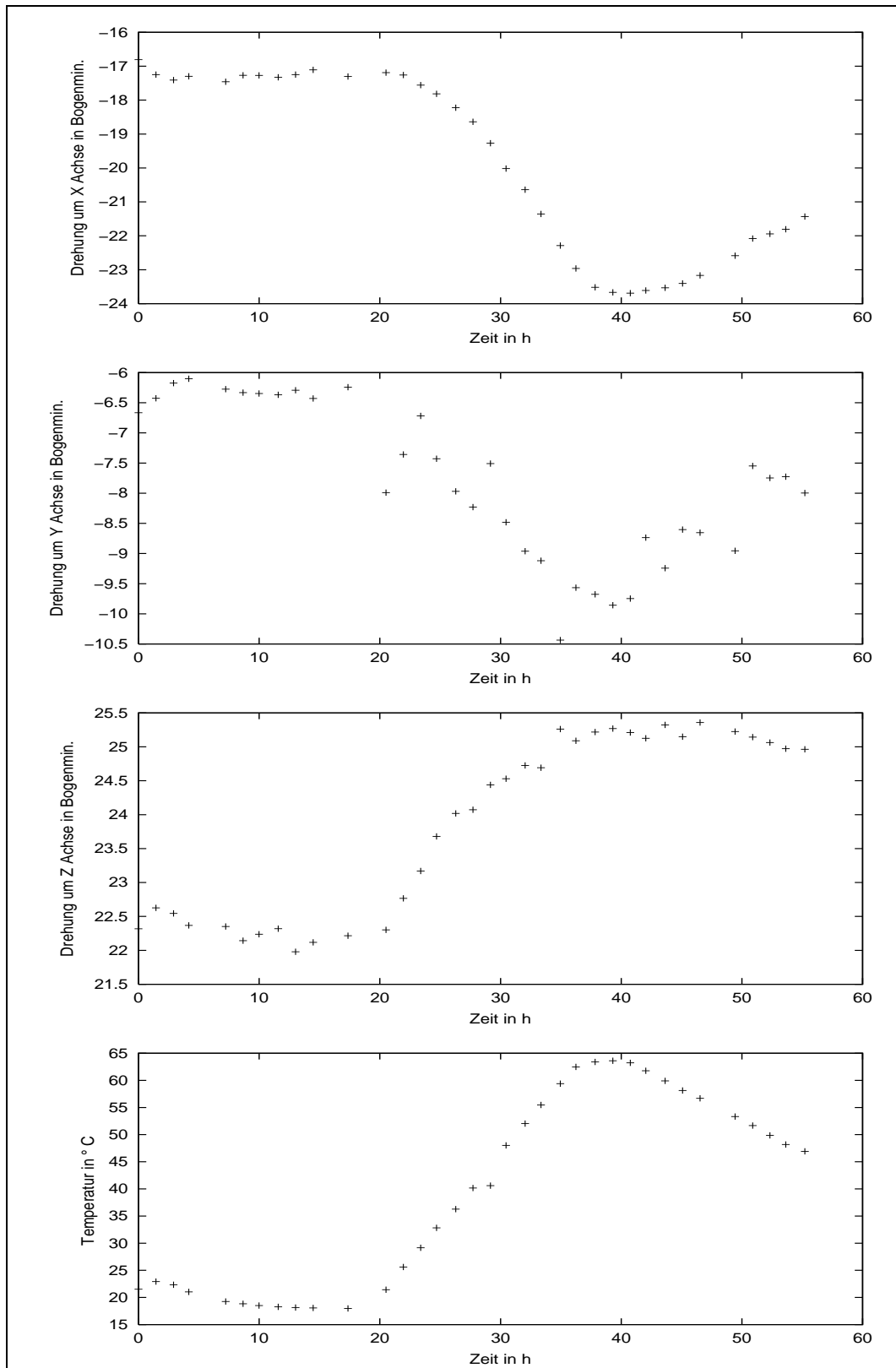


Abbildung 3.15: Ermittelte Euler Drehung des Sensors über der Zeit



### 3.7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aufbauend auf den Auswertungen im Abschnitt 3.7 können die folgenden Parameter für den Outboard Sensor im Range 5 im Telemetriemode D angegeben werden:

Empfindlichkeit  $X$ -Komponente:  $0.98271 - 0.00014056[1/^{\circ}\text{C}] * T[^{\circ}\text{C}]$ ,

Empfindlichkeit  $Y$ -Komponente:  $1.0097 - 0.00015446[1/^{\circ}\text{C}] * T[^{\circ}\text{C}]$ ,

Empfindlichkeit  $Z$ -Komponente:  $1.0025 - 0.00014063[1/^{\circ}\text{C}] * T[^{\circ}\text{C}]$ ,

Schiefstellung  $XY$ -Komponente in Bogenminuten:  $-18.476 + 0.16564[1/^{\circ}\text{C}] * T[^{\circ}\text{C}]$ ,

Schiefstellung  $XZ$ -Komponente in Bogenminuten:  $-14.26 - 0.013678[1/^{\circ}\text{C}] * T[^{\circ}\text{C}]$ ,

Schiefstellung  $YZ$ -Komponente in Bogenminuten:  $-18.786 - 0.09335[1/^{\circ}\text{C}] * T[^{\circ}\text{C}]$ ,

ermittelt bei einer Temperatur zwischen 18 und 64 °C.  $T$  bezeichnet die Temperatur in °C. Als Offset ergeben sich die folgenden Werte:

Offset  $X$ : +3.16 nT,

Offset  $Y$ : +1.19 nT,

Offset  $Z$ : +0.58 nT.

Die Referenz zwischen magnetischem und mechanischem Koordinatensystem muss durch eine optische Vermessung gewonnen werden. Aber dies ist nicht Teil dieser Arbeit.

Anmerkung: Die Darstellung in diesem Abschnitt ist insofern vereinfacht, als davon ausgegangen wird, dass eine einzelne Messung zur Bestimmung der Parameter ausreichend ist. Tatsächlich ist aber eine Wiederholung der verschiedenen Messungen notwendig um a) eventuell verdeckte zeitlich variierende Fehler zu finden, b) das Langzeitverhalten des Sensors zu untersuchen.

## 4 Nichtlineare Effekte

Das Magnetometer aus dem Beispiel aus Abschnitt 2.2 hat gezeigt, dass das standardmäßig angewandte lineare Kalibriermodell manchmal das Verhalten des untersuchten Instruments nicht vollständig beschreiben kann. Das Magnetometer dieses Beispiels erfüllt beispielsweise nicht die geforderte Spezifikation einer Genauigkeit von 8 nT vor einem Hintergrundfeld von 60000 nT. Im Weiteren werden Modelle zur Beschreibung der Sensoreigenschaften entwickelt, diskutiert und auf verschiedene Magnetometer angewendet.

### 4.1 Verfahren zur Bestimmung nichtlinearer Modellkoeffizienten

Für einen Teil der Modelle ist es notwendig eine in den Parametern nichtlineare Approximationsfunktion  $\underline{F}(\underline{x})$  zu bestimmen. Das Beispiel aus Gl.(2.26–2.29)

$$\begin{aligned}b_{f_{nu}} &= a_{Sp1}e_{Sp0u}u_{fu} + a_{Sp2}e_{Sp0v}u_{fv} + a_{Sp3}e_{Sp0w}u_{fw} + b_{fu}, \\b_{f_{nv}} &= a_{Sp4}e_{Sp0v}u_{fv} + a_{Sp5}e_{Sp0w}u_{fw} + b_{fv}, \\b_{f_{nw}} &= a_{Sp6}e_{Sp0w}u_{fw} + b_{fw}, \\b_{Proton} &= \sqrt{b_{f_{nu}}^2 + b_{f_{nv}}^2 + b_{f_{nw}}^2}\end{aligned}$$

erfordert zur Parameterbestimmung die Lösung einer nichtlinearen Minimierungsaufgabe. Nichtlineare Minimierungsaufgaben werden an vielen Stellen in der Literatur behandelt zum Beispiel [Überhuber 1995, Kowalsky 1979, Bronstein, Semendjajew 1979, Böhm et al. 1985, Press et al. 1994]. Die hier aufgegriffenen Aspekte einer nichtlinearen Programmierung sind größtenteils [Überhuber 1995] entnommen, der die Aufgabenstellungen und Techniken zu ihrer numerischen Lösung sehr schön zusammenfasst. Bei einer nichtlinearen Minimierungsaufgabe sind die Parameter der Approximation so zu bestimmen, dass der Abstand zwischen der Approximationsfunktion und den Daten minimal wird. Dabei kann es zu einem unerwünschten Phänomen kommen, da die zu minimierende Abstandsfunktion mehrere lokale Minima besitzen kann. Leider existieren keine Algorithmen, die mit absoluter Sicherheit das globale Minimum finden, das die Lösung des Approximationsproblems darstellt; die meisten Algorithmen versuchen nicht einmal, das globale Minimum zu bestimmen, und geben sich mit der Bestimmung eines lokalen Minimums zufrieden.

Ein überbestimmtes nichtlineares Gleichungssystem – bei dem die Anzahl  $m$  der Gleichungen größer als die Anzahl  $n$  der Unbekannten ist – besitzt im allgemeinen keine

Lösung. Man kann nur nach Vektoren  $\underline{x}^* \in \mathbb{R}^n$  der Datenmenge  $D$  suchen, die  $\underline{F}(\underline{x}) = 0$  „möglichst gut“ erfüllen, für die z.B.

$$\|\underline{F}(\underline{x}^*)\|_p = \min\{\|\underline{F}(\underline{x})\|_p : \underline{x} \in D\} \quad (4.1)$$

gilt. Es wird anstelle des Gleichungssystems  $\underline{F}(\underline{x}) = 0$  ein nichtlineares Ausgleichsproblem gelöst. Die Minimierung des Residuums in Gl.(4.1) hat bei überbestimmten Gleichungssystemen oft die Bedeutung der Schätzung eines Parametervektors in einem nichtlinearen Modell. Die Minimierungsaufgabe in Gl.(4.1) kann als nichtlineares Ausgleichsproblem bezüglich des Quadrates der Euklidischen Vektornorm  $\|\cdot\|_2$

$$\|\underline{F}(\underline{x})\|_2^2 = \underline{F}^T \underline{F}(\underline{x}) = \sum_{i=1}^m [f_i(\underline{x})]^2 \quad (4.2)$$

gelöst werden. Hierfür gibt es viele verschiedene Lösungsansätze, so z.B. Gauß–Newton–Verfahren, Newton–Verfahren, direkte Suchverfahren, Gradientenverfahren, Quasi–Newton–Verfahren, Verfahren mit variabler Metrik. Im folgenden wird nur das Gauß–Newton–Verfahren sowie als eine Erweiterung desselben das Levenberg–Marquardt–Verfahren behandelt, da genau diese Verfahren im Weiteren zur Lösung der nichtlinearen Gleichungssysteme verwendet werden.

Bei dem Gauß–Newton–Verfahren handelt es sich um ein iteratives Verfahren zur Minimierung von  $\|\underline{F}(\underline{x})\|_2^2$ . Dabei werden die Funktionen  $\underline{F}$  sukzessive durch lineare Funktionen

$$\underline{L}_k(\underline{x}) := \underline{F}(\underline{x}^{(k)}) + \underline{F}'(\underline{x}^{(k)})(\underline{x} - \underline{x}^{(k)}) \quad (4.3)$$

ersetzt und  $\underline{x}^{(k+1)}$  durch ein lineares Ausgleichsproblem bestimmt:

$$\|\underline{L}_k(\underline{x})\|_2^2 = \underline{L}_k^T \underline{L}_k(\underline{x}) \rightarrow \text{Min.} \quad (4.4)$$

Sofern die rechteckige Jacobi–Matrix

$$\underline{J}_k(\underline{x}) := \underline{F}'(\underline{x}^{(k)}) = \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_j}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \right) \quad (4.5)$$

den vollen Spaltenrang besitzt, falls also  $\text{rang}(\underline{J}_k) = n$  gilt, hat das lineare Ausgleichsproblem aus Gl.(4.4) eine eindeutige Lösung. Der Vektor  $\underline{s}_k := \underline{x}^{(k+1)} - \underline{x}^{(k)}$  kann z.B. aus den Normalgleichungen

$$(\underline{J}_k^T \underline{J}_k) \underline{s}_k = -\underline{J}_k^T \underline{F}(\underline{x}^{(k)}) \quad (4.6)$$

bestimmt werden.

Bei ungünstigen Startwerten ist es beim Gauß–Newton–Verfahren notwendig, mit einem langsamer konvergierenden Verfahren einen größeren Einzugsbereich zu gewinnen. In der Anfangsphase kann z.B. das Gradienten–Verfahren mit der Iterationsrichtung

$$\underline{d}_{k+1}^g := -\underline{J}_k^T \underline{F}(\underline{x}^{(k)}) \quad (4.7)$$

verwendet werden. Bei Annäherung an die Lösung wird dann auf das Gauß–Newton–Verfahren mit der Richtung

$$\underline{d}_{k+1}^N := -(\underline{J}_k^T \underline{J}_k)^{-1} \underline{J}_k^T \underline{F}(\underline{x}^{(k)}) \quad (4.8)$$

übergegangen. Beim Levenberg–Marquardt–Verfahren [Press et al. 1994] wird der Richtungsvektor durch

$$\underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM} := -(\underline{\mathbf{J}}_k^T \underline{\mathbf{J}}_k + \lambda \underline{\mathbf{E}})^{-1} \underline{\mathbf{J}}_k^T F(\underline{\mathbf{x}}^{(k)}) \quad (4.9)$$

definiert. Für  $\lambda = 0$  gilt  $\underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM} = \underline{\mathbf{d}}_{k+1}^N$ , für  $\lambda \rightarrow \infty$  gilt  $\underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM} \rightarrow \underline{\mathbf{d}}_{k+1}^g$ . Dementsprechend startet das Verfahren mit großen Werten von  $\lambda$  und verkleinert  $\lambda$  sukzessive nach Erreichen einer „günstigen“ Umgebung der Lösung.

Die Schrittweite  $h_k$  in

$$\underline{\mathbf{x}}^{(k+1)} := \underline{\mathbf{x}}^{(k)} + h_k \underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM} \quad (4.10)$$

wird in erster Linie so gewählt, dass ein Abnehmen der Residuen sichergestellt ist,

$$\|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k+1)})\| \leq \|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)})\| \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.11)$$

Das Levenberg–Marquardt–Verfahren kann numerisch wie folgt implementiert werden:

- **Schritt 1:** Setze Startwerte für  $\underline{\mathbf{x}}$ .
- **Schritt 2:** Berechne  $\|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)})\|$ .
- **Schritt 3:** Setze  $\lambda$  auf den größten Eigenwert der Matrix  $(\underline{\mathbf{J}}_k^T \underline{\mathbf{J}}_k)$ .
- **Schritt 4:** Löse Gleichung (4.9) und berechne  $\|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)} + h_k \underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM})\|$ .
- **Schritt 5:** Falls  $\|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)} + h_k \underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM})\| \leq \|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)})\|$  verkleinere  $\lambda$  um einen signifikanten Faktor z.B. 10. Gehe zu Schritt 4.
- **Schritt 6:** Falls  $\|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)} + h_k \underline{\mathbf{d}}_{k+1}^{LM})\| \geq \|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)})\|$  vergrößere  $\lambda$  um einen signifikanten Faktor z.B. 10. Gehe zu Schritt 4.

Da eine Iteration nur so lange durchgeführt werden sollte, wie die Änderung der Abstandsfunktion eine statistische Signifikanz hat, muss eine Abbruchbedingung definiert werden. Typische Werte hierfür sind in [Press et al. 1994] angegeben und werden erreicht wenn  $||\|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k)})\| - \|\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{x}}^{(k+1)})\||$  einen Grenzwert unterschreitet, also nur noch eine sehr kleine Veränderung des Residuums stattfindet.

Das Levenberg–Marquardt–Verfahren wird in dieser Arbeit zur Lösung nichtlinearer Ansätze verwendet.

## 4.2 Modelle zur Beschreibung nichtlinearer Effekte eines Magnetometers

### 4.2.1 Annahme einer nichtlinearen Empfindlichkeit

Der Ansatz eines linearen Modells versagt in dem Moment, in dem Teile der Elektronik zum Beispiel Operationsverstärker nichtlinear reagieren. Eine Nichtlinearität der Elektronik soll hier im Modell durch ein Polynom repräsentiert werden.  $e_1$  aus dem linearen Ansatz wird hierbei durch

$$b_x = \sum_{i=0}^N e_i f_s^i \quad (4.12)$$

mit

$$f_s = d_{11}b_u + d_{12}b_v + d_{13}b_w \quad (4.13)$$

$$= \cos(\angle[S, U])b_u + \cos(\angle[S, V])b_v + \cos(\angle[S, W])b_w. \quad (4.14)$$

ersetzt. Damit ergibt sich aus Gleichung (4.12)

$$b_x = \sum_{i=0}^N e_i (\cos(\angle[S, U])b_u + \cos(\angle[S, V])b_v + \cos(\angle[S, W])b_w)^i \quad (4.15)$$

wobei wiederum

$$1 = \cos(\angle[S, U])^2 + \cos(\angle[S, V])^2 + \cos(\angle[S, W])^2 \quad (4.16)$$

gelten muss. Die Zahl der relevanten Koeffizienten lässt sich stark verringern, wenn man den Sensor beispielsweise während der Messungen parallel zur  $U$ -Achse auf etwa  $1^\circ$  genau ausrichtet. Dann gilt

$$0^\circ \leq \angle[S, U] \leq 1^\circ \quad (4.17)$$

$$89^\circ \leq \angle[S, V] \leq 90^\circ \quad (4.18)$$

$$89^\circ \leq \angle[S, W] \leq 90^\circ \quad (4.19)$$

und damit

$$1 \geq \cos(\angle[S, U]) = d_{11} > 0.9985 \quad (4.20)$$

$$0.01745 \geq \cos(\angle[S, V]) = d_{12} > 0.0 \quad (4.21)$$

$$0.01745 \geq \cos(\angle[S, W]) = d_{13} > 0.0. \quad (4.22)$$

Im Falle, dass die Genauigkeitsanforderung nicht höher als das Produkt aus den nicht-linearen Koeffizienten  $e_i$  und den höheren Potenzen des Kosinus der Winkel  $[S, V]$  und  $[S, W]$  ist, können all jene Koeffizienten bei denen  $d_{12}$  oder  $d_{13}$  in höherer Potenz auftritt vernachlässigt werden. Damit folgt für Gl.(4.15)

$$b_x = e_0 \cos(\angle[S, U])b_u + e_0 \cos(\angle[S, V])b_v + e_0 \cos(\angle[S, W])b_w + e_1 \cos(\angle[S, U])^2 b_u^2 + \dots + e_N \cos(\angle[S, U])^N b_u^N. \quad (4.23)$$

Werden die  $e_0 \cos(\angle[S, U])b_u, \dots$  zu „neuen“ Koeffizienten zusammengefasst, so ergibt sich:

$$b_x = g_{10}b_u + g_{20}b_v + g_{30}b_w + \sum_{i=1}^N g_{1i}b_u^i \quad (4.24)$$

In den „neuen“ Koeffizienten ist die entstehende Gleichung linear und deshalb einfach mittels einer Bestapproximation im Quadratmittel zu lösen.

### 4.2.2 Annahme einer nichtidealen Richtungsabhängigkeit der Empfindlichkeit

Der obige Ansatz ist nicht in der Lage Sensoren mit Querfeldbeeinflussung geeignet zu approximieren. Diesen Fällen trägt der Ansatz einer nichtidealen Richtungsabhängigkeit Rechnung. Formal ergibt sich folgender Ansatz:

$$b_x = \sum_{i=0}^N e_i \left( \sum_{j=0}^{M_1} a_{1j} \cos(\angle[S, U]) b_u^j + \sum_{k=0}^{M_2} a_{2k} \cos(\angle[S, V]) b_v^k + \sum_{l=0}^{M_3} a_{3l} \cos(\angle[S, W]) b_w^l \right)^i. \quad (4.25)$$

Die Koeffizienten  $a_{1j}$ ,  $a_{2k}$ ,  $a_{3l}$  bringen die nichtlineare Richtungsabhängigkeit zum Ausdruck. Wieder werden die  $a_{1j} \cos(\angle[S, U]), \dots$  in „neuen“ Koeffizienten zusammengefasst. Damit folgt

$$b_x = \sum_{i=0}^N e_i \left( \sum_{j=0}^{M_1} g_{1j} b_u^j + \sum_{k=0}^{M_2} g_{2k} b_v^k + \sum_{l=0}^{M_3} g_{3l} b_w^l \right)^i. \quad (4.26)$$

Typischerweise wird allerdings bei Untersuchungen zur Querfeldbeeinflussung davon ausgegangen, dass Nichtlinearitäten in der Elektronik keine Rolle spielen. Deshalb wird  $N = 1$  und  $e_1 = 1$  gesetzt. Damit ergibt sich:

$$b_x = \sum_{j=0}^{M_1} g_{1j} b_u^j + \sum_{k=0}^{M_2} g_{2k} b_v^k + \sum_{l=0}^{M_3} g_{3l} b_w^l. \quad (4.27)$$

### 4.2.3 Modell ohne Vorkenntnisse über das Verhalten der Übertragungsfunktion

Wird in Gl.(4.26)  $N > 1$  gesetzt, die entstehende Gleichung nach Potenzen in  $b_u$ ,  $b_v$  und  $b_w$  geordnet und neue Koeffizienten  $a_{ijk}$  eingeführt, so entsteht ein sehr allgemeiner Ansatz:

$$b_x = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^P a_{ijk} b_u^i b_v^j b_w^k. \quad (4.28)$$

Dieser Ansatz lässt 216 Koeffizienten bei einer maximalen Ordnung von  $M, N, P = 5$  für die Anpassung zu. Hierbei ist die Entwicklung in ein Funktionensystem nach Polynomen nur eine Möglichkeit der Anpassung. Eine andere Möglichkeit der Entwicklung zum Beispiel nach Kugelfunktionen findet sich bei [Tarantola 1987].

### 4.2.4 Ansätze zur Lösung der Koeffizienten mit linearen und nichtlinearen Verfahren

Bei allen Ansätzen werden letztlich „neue“ Koeffizienten in einer Form angegeben, die es erlauben, eine Bestapproximation im Quadratmittel anzuwenden. Für den prak-

tischen Einsatz besteht aber immer die Aufgabe, die „inneren“ Parameter des Instruments von den Kalibrierbau spezifischen zu separieren. Die Separation ist notwendig, um Messungen mit einem unterschiedlichen Kalibrierbau vergleichen zu können. Geht man davon aus, dass der verwendete Kalibrierbau, in dem die Messungen stattfinden, als ideal zu betrachten ist, so sind Temperatur und die Drehmatrix  $\underline{\underline{D}}_{\text{Euler}}$  aus Gl.(3.22)

$$\underline{\underline{M}}_2 = \underline{\underline{D}}_{\text{Euler}} \underline{\underline{O}} \underline{\underline{E}}$$

als kalibrierbauabhängige Komponenten zu nennen. Eine sofortige Separation der drei Euler–Drehungen  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\nu$  von den „inneren“ Parameter des Instruments gelingt nur bei Annahme eines linearen Ansatzes (siehe Abschnitt 3.1). Die Separation der Euler–Drehungen in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 ist an zwei Bedingungen geknüpft:

1. **Vermessen des Instruments in mindestens zwei geometrischen Lagen**  
Hierdurch entstehen mindestens zwei Datensätze mit verschiedenen Koeffizienten für die Euler–Drehungen, aber gleichen „inneren“ Parametern.
2. **Lösung des entstehenden nichtlinearen Gleichungssystems**  
Dadurch können die „inneren“ Parameter von den Koeffizienten der Euler–Drehung getrennt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die in den „neuen“ Koeffizienten ermittelten Parameter zu verwenden, besteht darin, die geometrische Lage des Instruments in der Kalibrieranlage mit optischen Verfahren zu vermessen. Dann werden alle ermittelten Koeffizienten als „innere“ Parameter betrachtet. Dies hat aber zur Folge, dass Messungen in unterschiedlicher geometrischer Lage nur schwer oder gar nicht vergleichbar sind, da normalerweise eine exakte mechanische Reproduzierbarkeit der Lage bei verschiedenen Messungen nicht gewährleistet werden kann.

Einen weiteren wichtigen Aspekt bildet die Frage nach Methodik und Genauigkeit der zur Approximation anzuwendenden Verfahren (siehe hierfür auch Abschnitt 4.1 und 3.2). Damit aus Messungen global gültige Modellparameter gewonnen werden können, sollten die Eingangsgrößen idealerweise kontinuierlich variiert werden, sodass alle möglichen Kombinationen erfasst werden. Im Normalfall ist diese Anforderung allerdings nicht erfüllbar, da die Zahl der notwendigen Messungen rasch zu groß wird. Deshalb wird im allgemeinen eine Bestapproximation im Quadratmittel angestrebt. Damit die Bestapproximation im Quadratmittel nicht zu einer diskreten Approximation degeneriert, ist das Verhältnis von unabhängigen Messungen zur Zahl der zu approximierenden Parameter entscheidend. Es sollte nach allen Erfahrungen größer als zehn sein. Eine weitere Grundvoraussetzung für die Erzeugung eines zur Kalibrierung „geeigneten“ Parametersatzes ist, dass die Messungen den zu parametrisierenden Raum vollständig aufspannen und dabei möglichst gleichmäßig verteilt sind. Aus dem oben Gesagten lässt sich ableiten, dass es sinnvoll ist, immer nach einem Minimalmodell zu suchen; also einem Modell, das mit möglichst wenigen Parametern die Messungen/das Instrument beschreibt.

### 4.3 Die Querfeldbeeinflussung

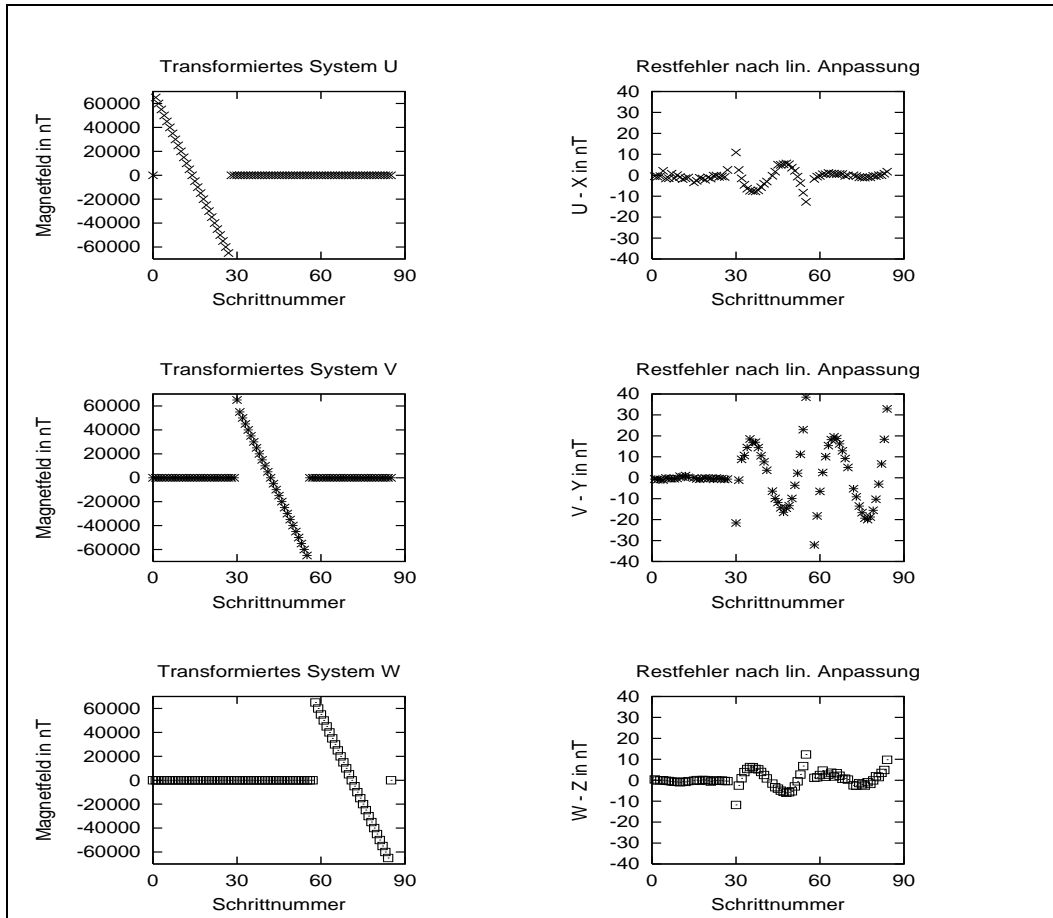


Abbildung 4.1: Anpassung eines linearen K-Modells. Links: Im Laborsystem angelegte Magnetfelder. Rechts: Restfelder nach Anpassung eines linearen K-Modells

Fluxgate-Magnetometer zeigen unter Umständen einen Effekt, der sich bereits im Beispiel im Abschnitt 2.2 andeutet. Führt man eine lineare Anpassung analog Abschnitt 3.1 durch, so ergibt sich nach Korrektur mittels der linearen Parameter die in Abbildung 4.1 gezeigten Restfehler. Hier ist deutlich erkennbar, dass der untersuchte Sensor in der  $X$ -Komponente auf Magnetfelder in Richtung seiner Messachse linear reagiert. Auf große Magnetfelder senkrecht zu ihrer Messrichtung reagiert die  $X$ -Komponente allerdings nichtlinear mit einer Abweichung von  $38 \text{ nT} / 60000 \text{ nT} = 6.3 \cdot 10^{-4}$ .

Diese Querfeldbeeinflussung<sup>1</sup> tritt bei manchen Magnetometern auf und spielt dann bei Messungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen vor einem großen Hintergrundmagnetfeld eine Rolle. Die  $Y$ -Komponente des Sensors aus obigen Beispiel zeigt ebenfalls eine Querfeldbeeinflussung. Allerdings sind auch nichtlineare Effekte in Richtung

<sup>1</sup>erstmalig von [Acuña 1981] beschrieben



ihrer Messrichtung beobachtbar. Ähnliches gilt für die  $Z$ -Komponente des Sensors. Aufgrund der geometrischen Nähe der drei Komponenten zu einander und der damit verbundenen Beeinflussung der Komponenten untereinander (siehe auch Abschnitt 3.6) kann zunächst keine eindeutige Ursache für die beobachteten Effekte angegeben werden. Deshalb werden zur weiteren Verifizierung einige Magnetometer untersucht. Einen Überblick dazu gibt der folgende Abschnitt.

## 4.4 Untersuchte Magnetometer

Um die Anwendbarkeit des K-Modells auf Magnetometer unterschiedlicher Bauart testen zu können, werden im Rahmen dieser Arbeit die Auswertungen und das Datenmaterial von Kalibriermessungen mehrerer Dreiachsmagnetometer und Einzelsensoren eingehender untersucht.

Diese Untersuchungen erfolgen fast immer nachdem das Instrument das Laborsystem „Magnetsrode“ bereits verlassen hat. Deshalb ist es fast nie möglich, eventuell fehlende Daten „nochmals“ zu produzieren. Bei der Sichtung der Daten wird auf die folgenden Punkte großer Wert gelegt:

- **Die Verwendung „ungestörter“ Messungen**

Nur solche Messungen werden verwendet, bei denen eine magnetisch saubere und ungestörte Umgebung nachweisbar vorhanden ist.

- **Gleichartige Vorverarbeitung der Daten**

Alle Daten werden mit den gleichen Methoden vorverarbeitet (siehe Abschnitt 2.5).

Bei diesem Prozess werden insgesamt ca. 4–6 Gigabyte Daten verarbeitet, teilweise projektintern veröffentlicht ([Kügler 1997] [Kügler 1995] [Kügler 1992-1996]). Dabei kommen die bereits im Kapitel 2 sowie im Kapitel 3 vorgestellten Methoden zum Einsatz.

Abbildung 4.2 gibt zunächst einen Überblick über verschiedene Bauformen der Magnetfeldsensoren, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Alle Bauformen sind in der Abbildung unter gleichem Maßstab dargestellt. Die nächsten Abschnitte 4.4.1–4.4.10 stellen zusätzlich die untersuchten Magnetometer kurz vor. Soweit die Beobachtungen an diesen Magnetometern für das Thema dieser Arbeit interessant sind, werden sie im Abschnitt 4.5 in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

### 4.4.1 TEMAG-Experiment

Dies Experiment wurde im Rahmen der TSS-1 (1992) und TSS-1R (1996) Mission, einem italienisch-amerikanischem Projekt mit Beteiligung des Instituts für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, zur Untersuchung der Flugeigenschaften eines seilgefesselten Systems aus Shuttle und Satellit, geflogen. Die Höhe des Orbits lag bei etwa 300 km über Boden, sodass Magnetfelder in der Größenordnung von 40000 nT gemessen wurden. Die hier verwendeten Messungen wurden im Rahmen der Kalibrierung in der IABG Ottobrunn und in Magnetsrode gewonnen ([Rahm 1994, Kügler 1995, Kügler 1992]). Das Instrument selbst besteht

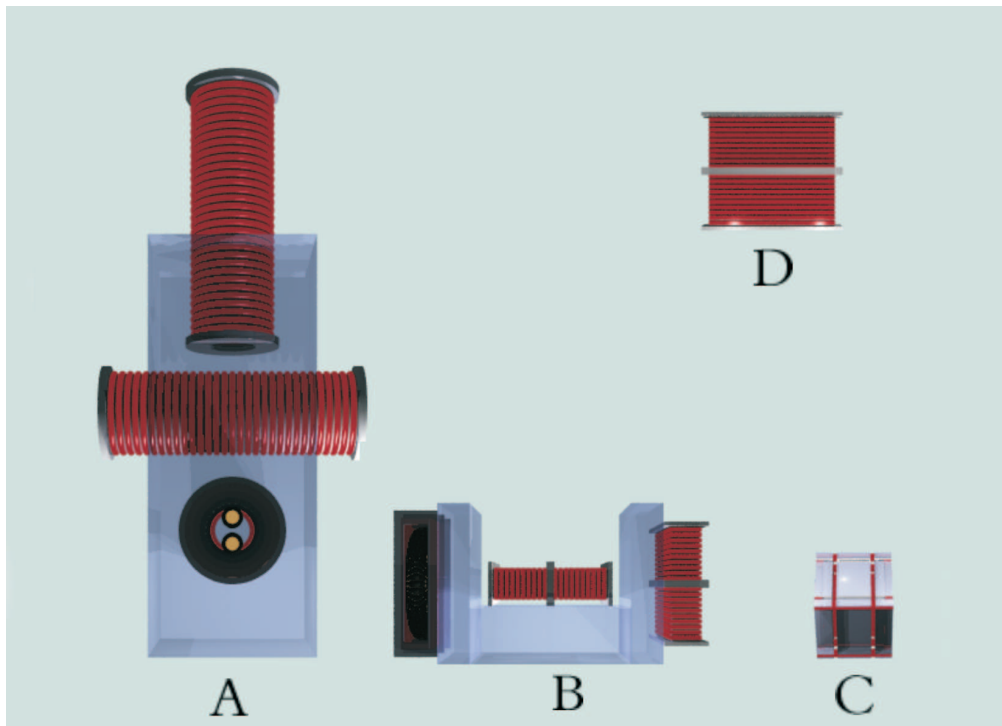


Abbildung 4.2: Übersicht aller verwendeten Sensoren: A) Typ Förster; B) Typ CLUSTER, TETHER; C) Typ DS1 D) Einzelsensor. Alle Sensoren sind entsprechend ihrer Größen dargestellt.

aus zwei dreiachsigen Fluxgate-Magnetometern, die in einer Doppel-T-Form (siehe Abbildung 4.2 B) montiert sind. Die Sensoren sind teilkompensiert, d.h. das zu messende Feld wird von den Kompensationsspulen nur in Richtung der Messachse eines jeden Sensors kompensiert. Sensoren gleichen Typs werden auch für CLUSTER verwendet. Die TEMAG Magnetometer mit einem Messbereich von  $\pm 65000$  nT zeigen einen nichtlinearen Effekt von bis zu  $\pm 30$  nT bei einem Hintergrundmagnetfeld von  $60000$  nT, der sich bei der Kalibrierung in dem Restfehler nach Anpassung eines linearen Modells (K-Modell) manifestiert. Ein großer Teil dieses Effektes entsteht aber bereits in der Elektronik.

#### 4.4.2 CLUSTER1-Experimente

Hierbei handelt es sich um insgesamt sechs baugleiche Experimente, die für den Einsatz im Sonnenwind und innerhalb der Magnetosphäre der Erde zur Bestimmung von Plasma-Parametern auf den vier CLUSTER-Satelliten (ESA Projekt) eingesetzt wurden. Dabei wurden Felder in der Größenordnung von wenigen Tausend nT erwartet. Jedes der sechs Experimente besteht wie das TEMAG-Experiment aus zwei dreiachsigen Fluxgate-Magnetometern, die in einer Doppel-T-Form (siehe Abbildung 4.2 B) angeordnet sind.

Die Magnetometer dieser Experimente sind nicht für den Einsatz unter Erdmagnetfeldbedingungen konzipiert. Ihr größter Messbereich ( $\pm 64000$  nT) ist deshalb nur ein

technologischer Messbereich, der während der Entwicklung zur Verifikation der Funktionalität des Experimentes benutzt wird.

Von 1992 bis 1996 wurden diese Experimente in „Magnetsrode“ und in der IABG Ottobrunn untersucht und kalibriert. Da es sich um 6 baugleiche Experimente handelt, ist die Streuung der Parameter in den kleinen Messbereichen, die auch für den Einsatz im Flug vorgesehen sind, klein. Zwar hat jedes der Magnetometer seine eigenen individuellen Parameter, jedoch treten keinerlei überraschende Variationen auf ([Rahm/Richter 1992-1996, Kügler 1992-1996]).

#### 4.4.3 CASSINI–Experiment

Das CASSINI–Magnetfeld–Experiment beinhaltet ein Fluxgate–Magnetometer, ein Vektor–Helium– sowie ein Skalar–Helium–Magnetometer. Die Sonde CASSINI, ein NASA Projekt, fliegt zum Saturn. Dabei werden Magnetfeldwerte von bis zu 10000 nT erwartet. Die Geometrie des in „Magnetsrode“(1996) kalibrierten Fluxgate–Magnetometersensors ist ähnlich der des beim TEMAG–Experiment verwendeten Sensors. Wieder handelt es sich um einen Sensor, der in einer Doppel–T–Form angeordnet ist. Die geometrischen Abmessungen dieses Sensors unterscheiden sich von denen des TEMAG– und CLUSTER– Sensors.

Das Magnetometer ist durch ein lineares Modell beschreibbar. Während der Kalibrierung dieses Instruments wird das erste Mal gezielt die geometrische Position des Sensors verändert, sodass vergleichbare Messungen in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen vorliegen. Dabei zeigt sich eine unerwartete Varianz der magnetischen Achsen des Sensors gegen die mechanische Drehung des Sensors im Laborsystems. Da die Parameter konstant bleiben solange der Sensor nicht bewegt wird, liegt die Vermutung nahe, dass entweder der Ringkern in einer der Achsen des Magnetometers nicht richtig befestigt ist, oder aber, dass sich das Kernmaterial im Sensor bei mechanischer Bewegung des Sensors bewegt. Ein genauer Nachweis hierfür kann aber nicht erbracht werden, da eine zerstörungsfreie Öffnung des Sensors nicht möglich ist und das Instrument die an es gestellte Spezifikation erfüllt.

#### 4.4.4 EquatorS–Experiment

Der EquatorS–Satellit ist konzipiert auf einer Flugbahn in Äquatorbreite in der oberen Magnetosphäre und im Schweif der Erde wissenschaftliche Daten zu sammeln. Das EquatorS–Magnetfeld–Experiment besteht wiederum aus zwei Fluxgate–Magnetometern in einer Doppel–T–Form ähnlich der des TEMAG Experimentes. Die Magnetometer wurden im März 1997 auch in „Magnetsrode“ untersucht. Auf Grund des Termindrucks stand nur ein Zeitraum von 3 Tagen für sämtliche Messungen an zwei Sensoren zu Verfügung. Aus diesem Grund wurde auf die Messung in einer zweiten geometrischen Position des Sensors verzichtet ([Kügler 1997, Rahm 1997b]).

#### 4.4.5 „Zopf–Mag“

Beim „Zopf–Mag“ handelt es sich um ein altes Förster–Raketenmagnetometer. In „Magnetsrode“ dient es seit Jahrzehnten als Stationsmagnetometer, das im Spu-

lensystem parallel zu den zu untersuchenden Magnetometern die Felder registriert und so eine Zuordnung eines Messeffektes zu dem untersuchten Instrument oder zu anderen Umwelteinflüssen im Labor erleichtert. Das „Zopf Mag“ ist ein Fluxgate-Magnetometer, dessen Sensoren aus Doppel-Stab-Kernen (Förstersonde) bestehen. Abbildung 4.2 A) zeigt die Bauform dieses Magnetometers. Eine Varianz der inneren Parameter gegen die Drehung des Sensors im Spulensystem kann nicht nachgewiesen werden.

### 4.4.6 DS1-Experiment und ROMA-Experiment

Im Zuge der Entwicklung neuer Bauformen für Fluxgate-Magnetometer Sensoren wurden 1997 und 1998 zwei verschiedene Prototypen verschiedener Hersteller auf den Effekt der Varianz der inneren Parameter gegen die Drehung des Sensors im Spulensystem untersucht. Bei beiden Sensoren konnte ein solcher Effekt nicht nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten teilkompensierten Sensoren, handelt es sich beim „DS1-Experiment“ und „ROMA-Experiment“ um Sensoren, die vollkompensiert werden. Alle drei Ringkerne befinden sich im Inneren des Sensors. Dabei sind die Kompensationsspulen des Sensors in einer Helmholtz-Anordnung so angeordnet, dass in ihrem Inneren das außerhalb des Sensors herrschende Magnetfeld fast vollständig kompensiert wird. So kann der Ringkern vollständig im „Nullfeld“ betrieben werden. Abbildung 4.2 C zeigt den prinzipiellen Aufbau des DS1-Sensors.

### 4.4.7 Einachsmagnetometer Nummer 1 („Sis“)

Beim „Sis“ Sensor/Magnetometer handelt es sich um einen KTB-Sensor<sup>2</sup>, der vom Aufbau den geometrischen Abmessungen und von der Verwendung des im Kern verwendeten magnetischen Materials ähnlich einem CLUSTER- oder TEMAG-Magnetometer ist (Abbildung 4.2 D). Da es sich um einen Experimentalsensor handelt, kann bei diesem Sensor zusätzlich der Ringkern in der Kompensationsspule verschoben und gedreht werden. Hierdurch wird eine Untersuchung des Einflusses der Lage des Ringkerns in der Kompensationsspule möglich, siehe auch Abschnitt 6.4. Der Ringkern einschließlich des hochpermeablen Materials wurde von der amerikanischen Firma Infinitics gefertigt.

### 4.4.8 Einachsmagnetometer Nummer 2 („Sisr“)

Dieser Sensor entspricht dem „Sis“-Sensor mit dem Unterschied, dass hier der Ringkern in der Kompensationsspule abgeglichen und in seiner optimalen Position (Minimierung des Offsets) fixiert ist.

---

<sup>2</sup>Das Kontinentale TiefBohr Programm der Bundesrepublik Deutschland (1983–1994) wurde durchgeführt, um Erkenntnisse über Beschaffenheit und Struktur der Erdkruste zu gewinnen. Dabei wurde eine Bohrung auf eine Tiefe von ca. 9.1 km abgeteuft. In der noch offenen Bohrung wurden zahlreiche geophysikalische Parameter vermessen, unter anderem auch das Erdmagnetfeld. Auf Grund der großen Tiefe der Bohrung musste das Magnetometer bei Temperaturen bis zu einer Außentemperatur von 300° Celsius arbeiten.

#### 4.4.9 Einachsmagnetometer Nummer 3 („Sisb“)

Es handelt sich dabei ebenfalls um einen Einzelsensor, dessen technische Daten denen der EquatorS-Magnetometer entsprechen. Der Ringkern ist wieder in seiner optimalen Position (Minimierung des Offsets) fixiert. Die Bauform ist ähnlich der des TEMAG-, CLUSTER-Typs. Die Abnehmerspule ist allerdings separat von der Kompensationspule ausgeführt (für weitere Erklärungen siehe Kapitel 5). Der Sensor selbst ist etwas größer als der des TEMAG-, CLUSTER-Typs. Der Ringkern wird von einem deutschen Hersteller gefertigt.

#### 4.4.10 Einachsmagnetometer Nummer 4 („Sisc“)

Der Ringkern des „Sisc“-Sensors besteht aus einem experimentellen hochpermeablen Material eines russischen Herstellers. Der Ringkern wird in den Spulenkörper des „Sis“-Sensors verbracht und auch mit der identischen „Sis“-Elektronik betrieben.

### 4.5 Vergleich des ermittelten Parametern verschiedener Instrumente

Bei den verschiedenen Kalibrierungen variiert die Anforderung, die an die Kalibrierung gestellt wird, in Bezug auf die Genauigkeit, die Bestimmung des Offsets, das AC Verhalten des Instruments und das Temperaturverhalten. Einige Magnetometer stehen zeitlich nur sehr kurz zu Verfügung, sodass nicht alle „üblichen“ Messungen durchgeführt werden können. Natürlich variierten auch Hersteller und Magnetometer-Modell, sowie die Dimensionen der Sensoren, der Aufbau der Elektronik, usw.

Folgt man der Theorie, wie sie z.B. in [Kertz 1969] und [Brauer 1997] dargestellt wird, so sollte ein Fluxgate-Magnetometer streng genommen absolut linear reagieren. Ferner sollten die das Instrument beschreibenden Parameter invariant gegen eine Drehung/Verschiebung des Instruments innerhalb des homogenen Bereiches des Spulensystems sein<sup>3</sup>. Aus den durchgeführten Messungen der letzten Jahre ergibt sich das in Tabelle 4.1 gezeigte Bild.

Alle Anpassungen basieren auf Spike-Sphere-Kalibriermessungen (siehe auch Abschnitt 3.3.2). Mit ‚X‘ in Tabelle sind Koeffizienten, die zur Anpassung des best angepassten Modell verwendet werden, markiert. Damit gilt z.B. für  $b_x$ :

$$b_x = \sum_{i=1}^5 a_{xui} b_u^i + \sum_{j=1}^5 a_{yvj} b_v^j + \sum_{k=1}^5 a_{zwk} b_w^k. \quad (4.29)$$

Entsprechendes ergibt sich für  $b_y$  und  $b_z$ . Eine Vorwärtsanpassung (Laborsystem auf Magnetometer) wird in diesem Fall verwendet, da auch Einachssensoren untersucht werden. Dabei dient die Vorwärtsanpassung der Klärung der Struktur der Übertragungsfunktion und nicht einer später verwendbaren Berechnung der Instrumentenpa-

<sup>3</sup>Die Homogenität der Anlage, sowie die Reproduzierbarkeit der Messungen werden in Kapitel 2.4.6 beschrieben. Das gleichzeitig betriebene „Zopf“-Magnetometer sichert die Messungen gegen zeitliche Schwankungen des Kalibrier-Systems ab.

parameter. Die mit „Restfehler“ markierten Instrumente zeigen auch nach der bestmöglichen Anpassung Restfehler mit signifikante Strukturen (siehe auch 3.2.2). Die hier aufgeführten Beobachtungen decken sich teilweise mit den Beobachtungen, die zuerst in [Acuña 1981] zur Querfeldbeeinflussung von Fluxgate-Magnetometern beschrieben worden sind. Es lassen sich aber auch Magnetometer finden, bei denen keinerlei Querfeldbeeinflussung beobachtet werden kann. Die untersuchten Magnetometer können wie folgt klassifiziert werden:

- Alle Sensoren der Magnetometer außer dem „Zopf Mag“ (Nr. 6) enthalten einen Ringkern. Der Kern des „Zopf Mag“ (Förster Magnetometer) besteht aus einem ferromagnetischen Doppelstab.
- Alle Sensoren außer dem „Zopf Mags“ (Nr. 6), DS1 Magnetometer (Nr. 7) und „Roma“ Magnetometer (Nr. 8) verwenden die Bauform des Doppel-T für die Sensoren. Der mechanische Aufbau (Dimensionierung von Kern, Erregerwicklung, Kompensationsspule) der Sensoren unterscheidet sich nicht signifikant voneinander.
- Bei dem „DS1“ und „Roma“ Magnetometer (Nr. 7, 8) handelt es sich um vollkompensierte Sensoren. Das heißt, die Kompensationsspule ist in der Form einer dreiachsigen Helmholtzspule aufgebaut, sodass im Zentrum des Sensors das äußere magnetische Feld vollständig kompensiert werden kann.

Erwartungsgemäß besteht im Falle der vollkompensierten Sensoren keine Notwendigkeit, im K-Modell Koeffizienten höherer Ordnung zu verwenden. Ebenso besteht keine Notwendigkeit nichtlineare Koeffizienten zu verwenden, wenn der Messbereich kleiner als 10000 nT ist. Das Modell zur Beschreibung des EquatorS-Sensors benötigt im Messbereich bis 50000 nT nichtlineare Koeffizienten jeweils in der Messrichtung der einzelnen Achsen. Dies deutet auf einen Effekt in der Elektronik hin. Querfeldeffekte werden beim TEMAG-Experiment und den CLUSTER-Experimenten im Messbereich 7 (62000 nT) beobachtet. Beide Experimente sind weitestgehend baugleich und vom selben Hersteller gefertigt.

Noch verwirrender ist der Vergleich der Ergebnisse der Messungen an den Einzelsensoren. Hier sind in der Tabelle 4.1 unter Punkt 9 und 10 nur die beiden extremen Verhaltensweisen festgehalten. Es gibt Einzelsensoren, die eine extreme Querfeldbeeinflussung zeigen und andere, die keinerlei Querfeldbeeinflussung zeigen. Um diesem scheinbar widersprüchlichem Verhalten auf die Spur zu kommen, ist es notwendig ein Modell der Funktionsweise eines Magnetometers zu entwickeln. Außerdem reichen die standardmäßig bei einer Kalibrierung durchgeführten Messungen nicht aus, diesen Zusammenhang zu klären. Sie liefern einfach zu wenig Datenmaterial und Variationsmöglichkeiten unterschiedlicher Sensorparameter, um ein Modell zu seiner Beschreibung entwickeln zu können. Deshalb werden in den folgenden Kapiteln, neben der Entwicklung eines Sensormodells, Messungen an Einzelsensoren, verschiedenen Ringkernen und Magnetometerelektroniken durchgeführt.

Nr.	Instrument	Benutzte Modell-Koeffizienten															Kommentar	
		X-Sensor					Y-Sensor					Z-Sensor						
	Messbereich	u <sup>5</sup>	u <sup>4</sup>	u <sup>3</sup>	u <sup>2</sup>	u	v <sup>5</sup>	v <sup>4</sup>	v <sup>3</sup>	v <sup>2</sup>	v	w <sup>5</sup>	w <sup>4</sup>	w <sup>3</sup>	w <sup>2</sup>	w		
1	TEMAG	u v w	X		X X X	X X X			X X X	X X X	X X X				X X X		X X X	Restfelder Keine Messung in zweiter Lage
2	CLUSTER Range 7 64000 nT	u v w			X X X	X X X			X	X X X	X X X			X X			X X X	Restfelder abhängig von Lage
3	CLUSTER Range 5 3800 nT	u v w				X X X					X X X						X X X	Parameter abhängig von Lage
4	CASSINI Range 3 40000 nT	u v w				X X X					X X X						X X X	Parameter abhängig von Lage
5	EquatorS Range 3 50000 nT	u v w	X	X	X	X X X	X	X	X	X	X					X	X X X	Keine Messung in zweiter Lage verfügbar
6	Zopf Mag Range 100000 60000 nT	u v w				X X X					X X X						X X X	
7	DS1  16000 nT	u v w				X X X					X X X						X X X	
8	ROMA  3000 nT	u v w				X X X					X X X						X X X	
9	Einzel-Sensor „Sis“ 60000 nT	u v w	X	X	X	X X X					- - -						- - -	Nur Querfeld- beeinflussung
10	Einzel-Sensor EquatorS 3000 nT	u v w				X X X					- - -						- - -	Querfeld- beeinflussung nicht nachweisbar

Tabelle 4.1: Übersicht über alle untersuchten Magnetometer

# 5 Modell eines Magnetometersensors

Am Ende des letzten Kapitels zeigt sich, dass das K-Modell zwar durch Anpassung von Kalibrierkoeffizienten eine nachträgliche Verbesserung der Messwerte des Instruments erlaubt, dass es aber nicht in der Lage ist, die physikalischen Hintergründe dieses Verhaltens insbesondere bei der Verwendung nichtlinearer Koeffizienten zu beschreiben. Der Frage nach eben diesen Hintergründen wird in den folgenden Kapiteln nachgegangen.

Hierzu wird ein Funktionsmodell eines Magnetometers (F-Modell) entwickelt. Dieses Modell ist in der Lage, das nichtlineare Verhalten eines Magnetometers besser zu beschreiben.

## 5.1 Funktionsmodell des Magnetometers (F-Modell)

### 5.1.1 Systematischer Aufbau

Verschiedene Autoren, zum Beispiel [Aschenbrenner/Goubau 1936, Acuña et al. 1978, Afanasjew 1994, Primdahl 1979, Brauer 1997, Korth 1998, Kuhnke et al. 1998] haben Fluxgate-Magnetometer und ihre Weiterentwicklung in ihren Arbeiten beschrieben. Abbildung 5.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau zweier moderner Magnetometer vom Oberwellentyp, wie sie zur Zeit auf Satelliten verwendet werden. Bei der linken Funktionszeichnung handelt es sich um ein Analog-Magnetometer, wie es bereits z.B. auf CLUSTER oder CASSINI eingesetzt wird. Die rechte Funktionszeichnung zeigt ein Digital-Magnetometer, wie es auf dem ROSETTA-Lander verwendet wird.

Bei einem Analog-Magnetometer wird die Anregung, durch eine analoge Baugruppe generiert, gleichzeitig auf den Sensor und zur Analogelektronik geschickt. Die Analogelektronik nimmt ihrerseits auch das Induktionssignal (Sense-Signal) des Sensors auf und steuert über die Gegenkopplung durch den Kompensationsstrom den Arbeitspunkt des Sensors. So wird erreicht, dass im Inneren des Sensors das äußere Magnetfeld kompensiert wird und so ein sogenanntes „Nullfeld“ herrscht. Als Maß für das zu messende d.h. zu kompensierende Feld wird eine analoge Spannung generiert, die dem Kompensationsstrom proportional ist, und durch einen AnalogDigitalConverter, der sich in der DigitalProcessing Unit befindet, in ein digitales Signal gewandelt wird. Bei einem Digital-Magnetometer wird weitgehend auf analoge Bauelemente verzichtet<sup>1</sup>. Die Anregung wird mittels eines FieldProgramming Gate Array erzeugt, das Induktionssignal des Sensors mittels eines ADC aufgenommen. Das Gegenkopplungssignal

---

<sup>1</sup>Die DPU beinhaltet die Funktionalität, die bei dem Analog-Magnetometer durch die Baugruppen Anregung und Analogelektronik repräsentiert wird.



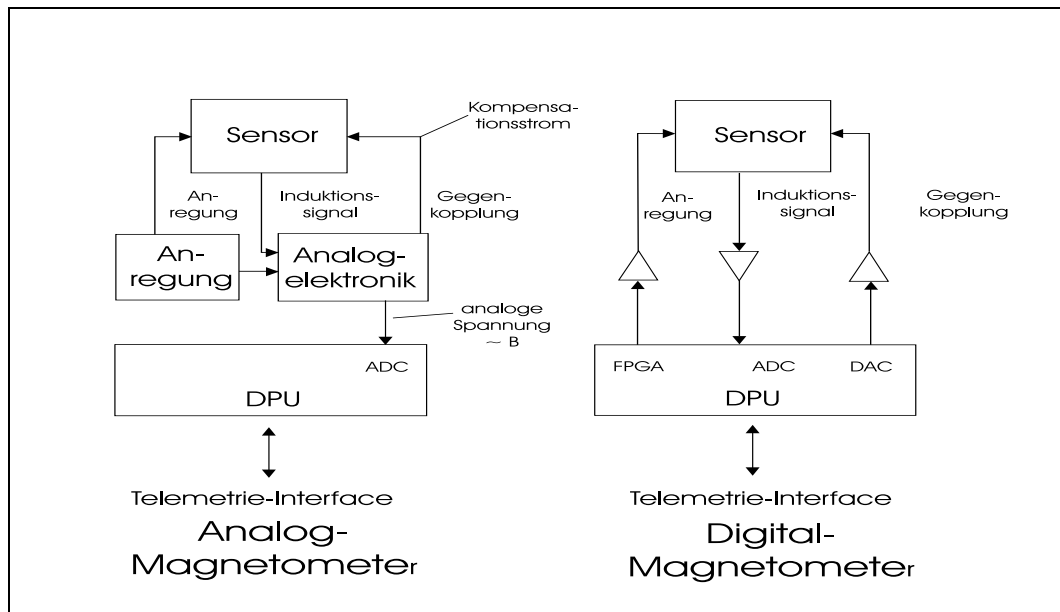


Abbildung 5.1: Blockschaltbild eines Analog- und eines Digital-Magnetometers

wird durch einen **DigitalAnalogConverter** generiert, der über einen Verstärker den Kompensationsstrom treibt. Die Leistungsaufnahme der digitalen Magnetometer liegt meistens über dem der analogen Magnetometer. Dies schränkt ihre Einsatzmöglichkeiten in der Weltraumforschung ein.

### 5.1.2 Physikalisches Funktionsprinzip

Zur Entwicklung eines Sensormodells ist es notwendig, das in Abbildung 5.1 gezeigten Funktionsschema genauer zu untersuchen. Im Vordergrund steht dabei die Beschreibung des Wechselwirkungsmechanismus zwischen Anregung, Induktionssignal, Analogelektronik und Gegenkopplung. Bei der Betrachtung der Funktionsweise eines Fluxgate-Magnetometers, wie es z.B. in [Kertz 1969, Brauer 1997] dargestellt wird, ergibt sich das folgende Funktionsschema (Abbildung 5.2):

1. Der in der Anregung erzeugte Erregerstrom wirkt über sein in der Erregerspule erzeugtes Magnetfeld auf das Kernmaterial.
2. Das Kernmaterial transformiert das durch das Erregersignal erzeugte Magnetfeld, sowie das am Orte des Sensors bestehende Hintergrundmagnetfeld mittels einer nichtlinearen Übertragung in eine magnetische Induktion.
3. Die so entstehende magnetische Induktion wirkt ihrerseits auf eine weitere Induktionsspule (Abnehmer- oder auch Aufnehmerspule) und erzeugt hier eine Induktionsspannung (Induktionssignal).
4. Die Induktionsspannung wird in der Analogelektronik gefiltert, um die zweite Harmonische zu gewinnen.

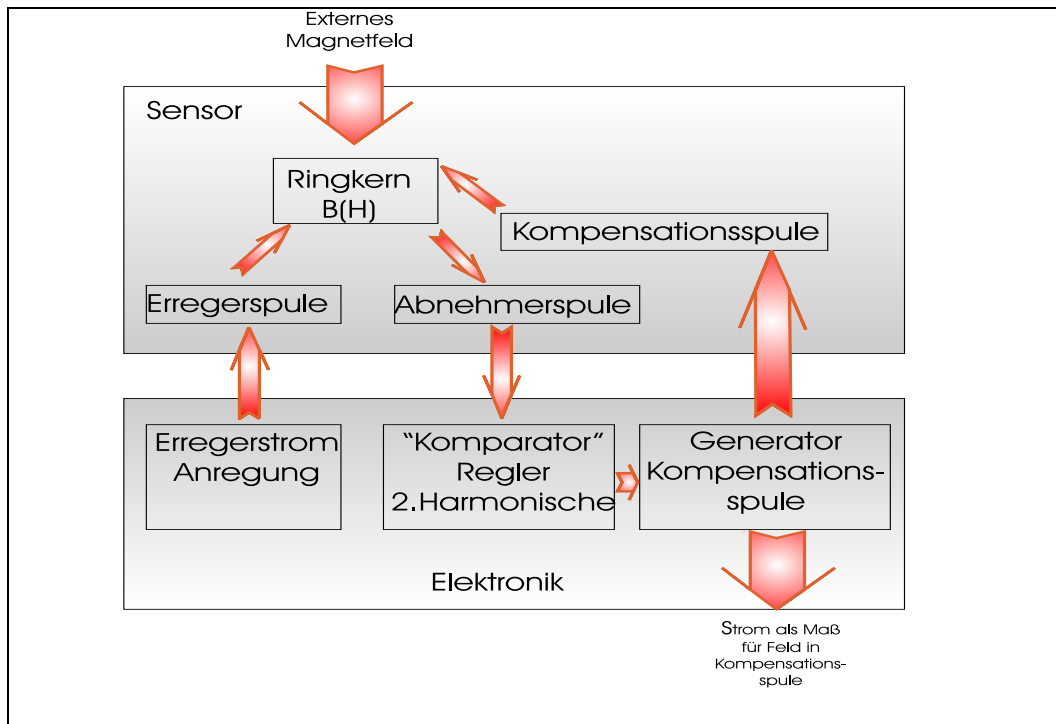


Abbildung 5.2: Funktionsweise eines Fluxgate-Magnetometers nach dem Oberwellenprinzip (schematisch)

5. Der Strom in der Kompensationsspule wird so gesteuert, dass die Amplitude der zweiten Harmonischen verschwindet.
6. Als Maß für das am Orte des Sensors herrschende Magnetfeld wird der durch die Kompensationsspule fließende Strom verwendet.

Die Skizze in Abbildung 5.3 zeigt den mechanischen Aufbau eines Einachssensors. Abgebildet ist der Einzelsensor „Sis“. Das Kernmaterial im Ringkern besteht aus einem hochpermeablen Band<sup>2</sup>. Seine mechanische Form wird durch Walzen aus einem Blech gewonnen. Die nach dem Walzen sehr dünne Schicht (typischerweise einige  $\mu\text{m}$  dick) wird zu Bändern geschnitten und in mehreren Lagen (5–10 Lagen) auf den Ringkernträger gewickelt und fixiert<sup>3</sup>. Die Fixierung soll eine mechanische Bewegung des Bandmaterials gegen den Ringkernträger verhindern. Um den Ringkernträger wird die Erregerspule gewickelt. Der so entstehende Ringkern wird möglichst symmetrisch im Zentrum des Spulenkörpers der Kompensationsspule montiert. Im Falle des KTB-Magnetometers ist die Kompensationsspule gleichzeitig die Abnehmerspule.

<sup>2</sup>meist Molybdän Permalloy

<sup>3</sup>punktgeschweißt oder geklebt

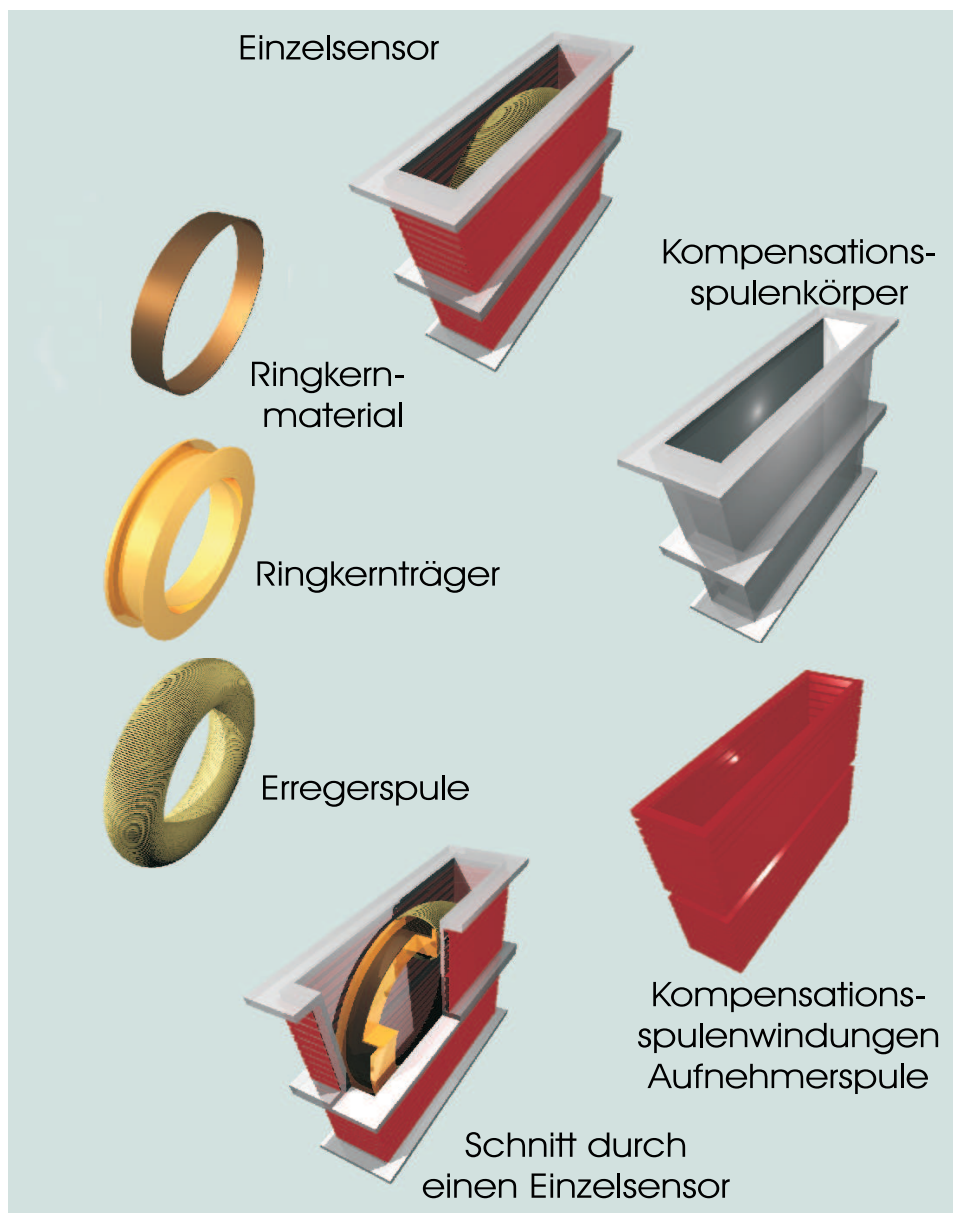


Abbildung 5.3: Skizze eines Einzelsensors

## 5.2 Numerische Simulation des F-Modells

Um das in Abbildung 5.2 entwickelte F-Modell (Funktionsmodell) quantitativ in Rechnungen fassen zu können, werden die einzelnen Komponenten in die Blöcke

- Block I : Erzeugung der magnetischen Induktion,
- Block II : Abnehmerspule,
- Block III : Kompensationsspule,
- Block IV : Regelektronik

unterteilt (siehe Abbildung 5.4) und simuliert. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass der elektronische Filter sowie die Erzeugung des Erregersignals als ideal angesehen werden können. Dieser Schluss basiert auf den Resultaten durchgeführter Messungen, siehe auch Abschnitt 6.1. Wäre der elektronische Filter oder die Erzeugung des Erregersignals nicht ideal, so hätten sich hierfür Anhaltspunkte bei den Messungen ergeben<sup>4</sup>.

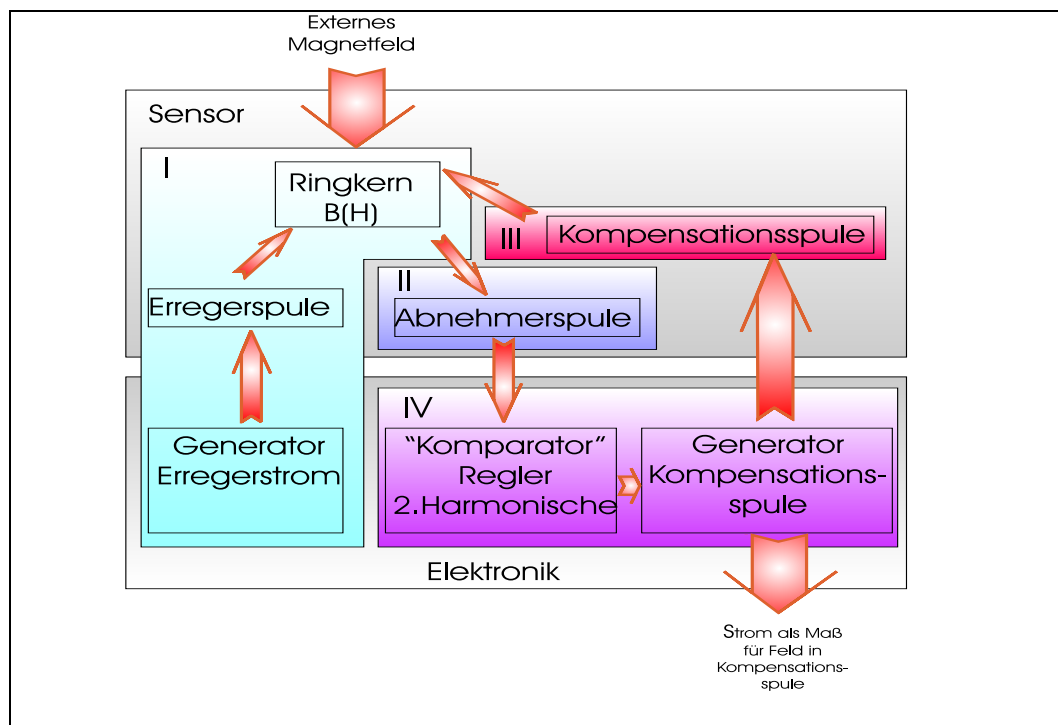


Abbildung 5.4: Aufbereitung des F-Modells für die Simulation

### 5.2.1 Block I-1: Erzeugung des Erregersignals

Als Signalform des Erregersignals wird von [Aschenbrenner/Goubau 1936, Kertz 1969] eine sinusförmige Anregung vorgeschlagen. In den meisten neueren Magnetometern wird jedoch eher eine Anregung mittels periodischer kurzer Impulse

<sup>4</sup>z.B. Nichtlinearitäten des Sensors in Messrichtung

[Afanasjew 1994, Brauer 1997, Kuhnke et al. 1998] nach dem Prinzip der ferromagnetischen Resonanz vorgezogen. So gelingt es, bei gleicher mittlerer Leistungsaufnahme des Instruments kurzfristig eine höhere Energie zur Magnetisierung des Kernmaterials bereit zu stellen.

Da der Fall einer sinusförmigen Anregung analytisch recht einfach behandelt werden kann, wird er für die weitere Entwicklung der Simulation verwendet. Eine Erweiterung auf andere Signalformen ist um den Preis eines höheren Rechenaufwands stets möglich. Für den Erregerstrom  $I_{\text{Err}}$  wird eine direkte Funktion der Erregerfrequenz  $\nu = \omega/2\pi$  und der Erregeramplitude  $A'_0$  angesetzt:

$$I_{\text{Err}}(t) = A'_0 \sin \omega t. \quad (5.1)$$

Das von der Erregerwicklung erzeugte Magnetfeld  $H(t)$  ist demnach dem Strom  $I_{\text{Err}}(t)$  proportional. Damit ergibt sich

$$H_{\text{Err}}(t) = A_0 \sin \omega t. \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Block I-2: Beschreibung der Transformation des Magnetfeld in die magnetische Induktion im Kernmaterial

Ein sinusförmiges Erregerfeld  $H_{\text{Err}}(t)$  induziert im ferromagnetischem Kern eine magnetische Induktion  $B_{\text{Err}}(t)$ . Nach [Aschenbrenner/Goubau 1936] und [Kertz 1969] lässt sich die  $B(H)$  Kurve durch ein Polynom dritten Grades

$$b(h) = 3h - h^3 \quad (5.3)$$

beschreiben. Hierbei ist  $H$  auf das Sättigungsmagnetfeld  $H_{\text{Satt}}$  normiert und mit  $h = H_{\text{Err}}/H_{\text{Satt}}$  folgt  $\|h\| \leq 1$ . Diese Magnetisierungskurve berücksichtigt keine Hystereseeffekte.

Das vielfach vorgeschlagene und benutzte Modell einer vereinfachten Magnetisierungskurve ([Kupke 1984, Lühr 1980, Brauer 1997]), in der Bereiche der Kurve abschnittsweise durch Geraden approximiert werden, wird hier bewusst nicht verwendet, da bei diesem Ansatz Nichtlinearitäten nur in Form von Unstetigkeitsstellen an den Anschlussstellen der Abschnitte auftreten. Innerhalb der Abschnitte ist auf Grund ihrer Definition die Steigung konstant.

### 5.2.3 Block I-3: Das magnetische Verhalten des Kerns in der Simulation

Ursprünglich war geplant, die magnetischen Eigenschaften des Kerns bzw. die Wechselwirkung des Kernmaterials mit einem äußeren Magnetfeld mittels der Potentialtheorie zu beschreiben. Ansätze hierfür finden sich zum Beispiel bei [Kertz 1983, Tarantola 1987, Blakely 1996, Kampke 1996]. Letztlich scheitert dieser Versuch jedoch an den Größenunterschieden zwischen den Abmessungen des magnetischen Kernmaterials ( $4 - 10 \mu\text{m}$ ) und dem Durchmesser des Kerns selbst (einige cm). Um diese großen Unterschiede modellieren zu können, wäre ein dreidimensionales Modellgitter

mit mindestens  $10000^3 = 10^{12}$  Punkten oder der Übergang zu einem Modell basierend auf finiten Elementen notwendig gewesen. Eine Weiterverfolgung dieses Weges erscheint aufgrund des notwendigen Rechenaufwands nicht sehr sinnvoll. Um trotzdem zu einem Modell für das magnetische Verhalten des Kerns zu gelangen, wird eine weitere Vereinfachung der Beschreibung vorgenommen.

Abbildung 5.5 illustriert auf der linken Seite den geometrischen Aufbau eines Teilseg-

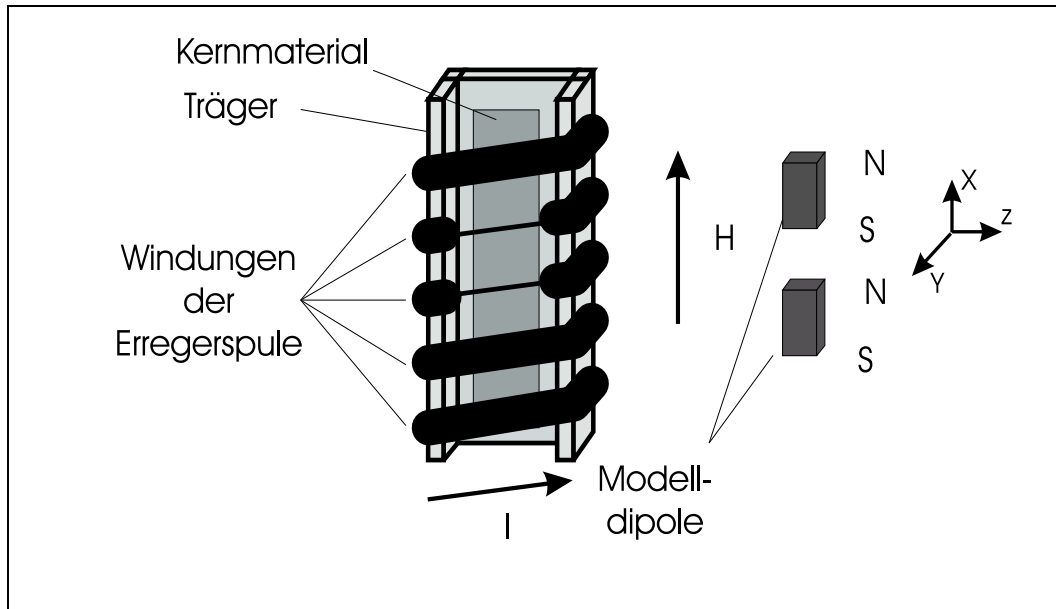


Abbildung 5.5: Zur Modellierung des Kerns

ments des Ringkerns mit den Windungen der Erregerspule und dem Träger mit seinem Kernmaterial. Die Windungen der Erregerspule induzieren in das Kernmaterial ein Magnetfeld und ändern die Magnetisierung  $\underline{J}$  des hochpermeablen Kernmaterials. Das  $\underline{B}$ -Feld ist mit dem  $\underline{H}$  Feld und der Magnetisierung über

$$\underline{B} = \mu_0 (\underline{H} + \underline{J}) \quad (5.4)$$

und

$$\underline{J} = \chi \underline{H} \quad (5.5)$$

mit der Suszeptibilität  $\chi$  zu

$$\underline{B} = \mu_0 (\underline{H} + \chi \underline{H}) \quad (5.6)$$

$$= \mu_0 (1 + \chi) \underline{H} \quad (5.7)$$

$$= \mu_0 \mu_{\text{rel}} \underline{H} \quad (5.8)$$

verbunden. Hierbei ist  $\mu_{\text{rel}}$  die materialabhängige Permeabilitätszahl. Auf der rechten Seite sind die entsprechenden Komponenten im Modell dargestellt. Dabei wird das Ringkernsegment der linken Seite durch zwei Stabmagnete substituiert. Das Feld eines Stabmagneten hängt vom Material und der Form des Stabes ab. Dies gilt aber nur für den Nahbereich, schon vom Abstand einiger Stablängen an stimmen die Felder

beliebiger Stabmagnete im Feldverlauf überein. Das Fernfeld kann man berechnen als Feld eines magnetischen Dipols [Kertz 1983]. Das Feld eines magnetischen Dipols an der Stelle  $\underline{r}$  ergibt sich unter Verwendung des Dipolmoments  $\underline{m}$  zu

$$\underline{B}(\underline{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\underline{m} \cdot \underline{r}) \underline{r} - |\underline{r}|^2 \underline{m}}{|\underline{r}|^5}. \quad (5.9)$$

Im Modell wird der Änderung der Magnetisierung  $\underline{J}$  eine Änderung der Dipolstärke  $\underline{m}$  zugeordnet. Jeder Modelldipol „sieht“ an seiner Position  $\underline{p}_{\text{Dip}}$  das resultierende Feld  $\underline{H}_{\text{Res},t}$ , bestehend aus einem zeitlich invarianten und einem zeitlich varianten Anteil. Bei  $\underline{H}_{\text{Err}}$  handelt es sich um den zeitlich varianten Anteil. Für die weiteren Betrachtungen wird die Bedingung für einen Gleichgewichtsfall gesucht, bei der die Größen des externen zu messenden Feldes  $\underline{H}_{\text{Ext}}$  und des von der Kompensationsspule aus Block III erzeugten Feld  $\underline{H}_{\text{Komp}}(\underline{p}_{\text{Dip}})$  als quasi zeitlich invariant betrachtet werden.

$$\begin{aligned} \underline{H}_{\text{Res},t}(\underline{p}_{\text{Dip}}) &= \underline{H}_{\text{Ext}} + \underline{H}_{\text{Komp}}(\underline{p}_{\text{Dip}}) + \underline{H}_{\text{Err}}(\underline{p}_{\text{Dip}}) \\ &= \underline{H}_{\text{Res}}(\underline{p}_{\text{Dip}}) + \underline{H}_{\text{Err}}(\underline{p}_{\text{Dip}}). \end{aligned} \quad (5.10)$$

$\underline{H}_{\text{Ext}}$  und  $\underline{H}_{\text{Komp}}(\underline{p}_{\text{Dip}})$  werden zum zeitlich invarianten Anteil  $\underline{H}_{\text{Res}}$  von  $\underline{H}_{\text{Res},t}$  zusammengefasst. Für die weiteren Betrachtungen erweist es sich als günstig, für jeden der verwendeten Dipole ein eigenes lokales kartesisches Koordinatensystem einzuführen, das wie folgt definiert wird (siehe auch Abbildung 5.5): Die  $X$ -Achse dieses lokalen Koordinatensystems zeigt in Richtung des von der Erregerspule an dieser Stelle erzeugten Magnetfeldes (Einheitsvektor  $\underline{e}_{\text{Dip},x}$ ). Die  $Y$ -Achse (Einheitsvektor  $\underline{e}_{\text{Dip},y}$ ) zeigt immer in Richtung des Radius des Ringkerns nach außen. Die  $Z$ -Achse schließlich wird so konstruiert, dass ein rechthändiges Koordinatensystem entsteht (Einheitsvektor  $\underline{e}_{\text{Dip},z}$ ).

Damit ergibt sich das an der Stelle eines Dipols erzeugte Feld  $H_{\text{Dip},x}$  zu:

$$H_{\text{Dip},x}(\underline{p}_{\text{Dip}}) = \underline{H}_{\text{Res}}(\underline{p}_{\text{Dip}}) \underline{e}_{\text{Dip},x}. \quad (5.11)$$

Dieses Resultat kombiniert mit Gl.(5.2) liefert für das resultierende Feld in Achsrichtung des Dipols:

$$H_{\text{Dip},xt}(t) = H_{\text{Dip},x} + A_0 \sin \omega t. \quad (5.12)$$

Damit eine Beschreibung eines stets beobachteten Offsets und einer manchmal beobachteten nichtlinearen Querfeldeinflussung im Modell mit eingeschlossen ist, muss dieses erweitert werden.

In der Literatur z.B. [Olsen 1966, Chen 1977] wird ein physikalischer Effekt beschrieben, der in der englischsprachigen Literatur „incremental permeability“ genannt wird. Er beschreibt die Änderung der Form der Hysteresekurve wenn zum Wechsignalsignal des Erregers noch ein zusätzliches magnetisches Gleichfeld hinzutritt. Dies ist ein bei weichmagnetischen Stoffen häufig beobachteter Effekt. Werden zusätzlich noch mögliche Effekte der Hysterese berücksichtigt, so ist

$$b(h) = 3h - h^3 \quad (5.13)$$

in Gl.(5.3) formal durch

$$b(h) = a_k(h)h - b_k(h)h^3 \quad (5.14)$$

zu ersetzen, wobei  $a_k(h)$  und  $b_k(h)$  für beliebige Koeffizienten stehen, die allerdings vom lokalen magnetischen Feld  $h$  abhängen.

### 5.2.4 Block II: Wechselwirkung des Kerns mit der Induktionsspule

Die in einer Induktionsschleife erzeugte Spannung  $U_{\text{Ind}}$  wird mit dem Faradayschen Gesetz wie folgt beschrieben:

$$U_{\text{Ind}} = -\frac{d}{dt} \int_A \underline{\mathbf{B}} \cdot d\underline{\mathbf{A}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.15)$$

$d\underline{\mathbf{A}}$  zeigt in Richtung der Normalen von  $A$ . Das Integral ist über die Fläche zu bilden. Der magnetische Fluss  $\Phi$  ergibt sich durch  $\int_A \underline{\mathbf{B}} \cdot d\underline{\mathbf{A}} = \Phi$ , wobei  $\underline{\mathbf{B}}$  die magnetische Induktion ist.

Für den hier vorliegenden Fall bedeutet es, dass für jeden der Dipole des Kerns der magnetische Fluss durch die einzelnen Induktionsschleifen zu berechnen ist. Die von einem ortsfesten Dipol an einem festen Ort erzeugte magnetische Induktion ändert sich linear mit der Variation des Momentes des Dipols. Damit kann für eine ortsfeste Konfiguration aus Dipol und Induktionsspule ein fester Übertragungsfaktor  $f_{\text{geo}}$  für  $\Phi$  angegeben werden.

### 5.2.5 Block III: Kompensationsspule

Die Kompensationsspule dient im Sensor zur Erzeugung eines, dem äußeren Gleichfeld in Messrichtung entgegengerichteten Magnetfeldes. Mit Hilfe des Biot-Savartschen Gesetzes ist es möglich, das von einem Leiterstück erzeugte Magnetfeld  $\underline{\mathbf{H}}_{\text{Leiter}}$  an jedem beliebigen Aufpunkt  $\underline{\mathbf{p}}$  zu berechnen. Es ist:

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{Leiter}}(\underline{\mathbf{p}}) = \frac{I}{4\pi} \int_{\text{Leiter}} \frac{d\underline{\mathbf{s}} \times \underline{\mathbf{r}}}{r^3}. \quad (5.16)$$

Hierbei ist  $\underline{\mathbf{r}}$  der Vektor vom Leiterelement  $d\underline{\mathbf{s}} = \underline{\mathbf{E}}^0 ds$  zum Aufpunkt  $\underline{\mathbf{p}}$  mit  $\underline{\mathbf{E}}^0$  dem Einheitsvektor in Richtung des Leiters, sowie dem Strom  $I$  durch den Leiter.

Die Kompensationsspule wird aus einer endlichen Zahl  $N$  einzelner Leiterelemente modelliert analog zu [Kügler 1992]. Damit setzt sich das Magnetfeld der Kompensationsspule in einem Aufpunkt  $\underline{\mathbf{p}}$  wie folgt zusammen:

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{Komp}}(\underline{\mathbf{p}}) = \sum_{i=1}^N \underline{\mathbf{H}}_{\text{Leiter},i}(\underline{\mathbf{p}}). \quad (5.17)$$

Für alle weiteren Betrachtungen wird von einer festen geometrischen Konfiguration ausgegangen. Da das Magnetfeld  $\underline{\mathbf{H}}_{\text{Leiter}}$  am Ort  $\underline{\mathbf{p}}$  proportional dem durch das Linienelement fließenden Strom  $I_{\text{Komp}}$  ist, genügt es, die geometrische Proportionalitätskonstante  $\underline{\mathbf{k}}_{\text{Ort}}$  einmalig zu berechnen. Damit ergibt sich

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{Komp}}(\underline{\mathbf{p}}) = \underline{\mathbf{k}}_{\text{Ort}} I_{\text{Komp}}. \quad (5.18)$$



### 5.2.6 Block IV: Regelkreis; Synthese der Blöcke I–III

Wird eine Synthese aus allen Komponenten der Blöcke I–III gebildet, so ergibt sich für den Regelkreis das folgende zeitliche Verhalten:

Das Magnetfeld am Ort eines Dipols ergibt sich nach Gl.(5.12) zu:

$$H_{\text{Dip},\text{xt}}(t) = H_{\text{Dip},\text{x}} + A_0 \sin \omega t.$$

Mit der Substitution  $h_{\text{D}} := H_{\text{Dip},\text{x}}$  und  $p := A_0$  folgt unter Verwendung der Gl.(5.14) für

$$b(h) = a_{\text{k}}(h)h - b_{\text{k}}(h)h^3$$

und der Verwendung der Moivreschen Formel

$$\begin{aligned} b(t) &= h_{\text{D}} \left( a_{\text{k}} - b_{\text{k}} h_{\text{D}}^2 - b_{\text{k}} \frac{3}{2} p^2 \right) + p \left( a_{\text{k}} - 3b_{\text{k}} h_{\text{D}}^2 - b_{\text{k}} \frac{3}{4} p^2 \right) \sin \omega t \\ &\quad + \frac{3}{2} b_{\text{k}} h_{\text{D}} p^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4} b_{\text{k}} p^3 \sin 3\omega t. \end{aligned} \quad (5.19)$$

In der Induktionsspule ergibt sich damit ein magnetischer Fluss zu:

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= f_{\text{geo}} \left( h_{\text{D}} \left( a_{\text{k}} - b_{\text{k}} h_{\text{D}}^2 - b_{\text{k}} \frac{3}{2} p^2 \right) + p \left( a_{\text{k}} - 3b_{\text{k}} h_{\text{D}}^2 - b_{\text{k}} \frac{3}{4} p^2 \right) \sin \omega t \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{2} b_{\text{k}} h_{\text{D}} p^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4} b_{\text{k}} p^3 \sin 3\omega t \right). \end{aligned} \quad (5.20)$$

Hierbei beschreibt  $f_{\text{geo}}$  den Übertragungsfaktor zwischen Dipol und der Konfiguration der Induktionsspule. Das Induktionssignal ergibt sich zu:

$$\frac{d\Phi}{dt} = f_{\text{geo}} \left( p \left( a_{\text{k}} - 3b_{\text{k}} h_{\text{D}}^2 - b_{\text{k}} \frac{3}{4} p^2 \right) \omega \cos \omega t - 3b_{\text{k}} h_{\text{D}} p^2 \omega \sin 2\omega t + \frac{3}{4} b_{\text{k}} p^3 \omega \cos 3\omega t \right). \quad (5.21)$$

Klar erkennbar ist, dass das Signal der 2. Harmonischen nur für den Fall  $h_{\text{D}} \neq 0$  auftritt. Nach Filterung in der Elektronik bleibt nur noch der Term

$$-f_{\text{geo}} 3b_{\text{k}} h_{\text{D}} p^2 \omega \sin 2\omega t \quad (5.22)$$

erhalten. Resubstituieren führt auf

$$\frac{d\Phi^*}{dt} = -f_{\text{geo}} 3b_{\text{k}} H_{\text{Dip},\text{x}} A_0^2 \omega \sin 2\omega t \quad (5.23)$$

Dieser Ausdruck wird identisch Null nur für den Fall, dass  $H_{\text{Dip},\text{x}} = 0$  ist, da  $f_{\text{geo}} \neq 0$  und  $A_0 > 0$  ist.

Wird  $b_{\text{k}} H_{\text{Dip},\text{x}}$  durch ein Polynom mit den Koeffizienten  $p_{ij}$  in Abhängigkeit des Gleichfeldanteils  $H_{\text{Res}}$  angenähert, so ergibt sich unter Berücksichtigung der Transformation der Magnetfeldwerte in das auf die Sättigungsfeldstärke  $H_{\text{Satt}}$  normierte Koordinatensystem für den Ausdruck in Gl.(5.23)

$$\frac{d\Phi^*}{dt} = - \left[ p_0 + p_{1,1} \frac{H_{\text{Res},\text{x}}}{H_{\text{Satt}}} + p_{1,2} \left( \frac{H_{\text{Res},\text{x}}}{H_{\text{Satt}}} \right)^2 + \dots + \right]$$

$$\begin{aligned}
& + p_{2,1} \frac{H_{\text{Res},y}}{H_{\text{Satt}}} + p_{2,2} \left( \frac{H_{\text{Res},y}}{H_{\text{Satt}}} \right)^2 + \dots + \\
& + p_{3,1} \frac{H_{\text{Res},z}}{H_{\text{Satt}}} + p_{3,2} \left( \frac{H_{\text{Res},z}}{H_{\text{Satt}}} \right)^2 + \dots \Big] * \\
& 3f_{\text{geo}} A_0^2 \omega \sin 2\omega t.
\end{aligned} \tag{5.24}$$

Hierbei wird der kartesische Vektor  $\underline{H}_{\text{Res}}$  in seine drei Komponenten im lokalen Koordinatensystem des Dipols, das im Abschnitt 5.2.3 eingeführt wurde, aufgespalten. Wird der Sensor durch  $N$  Dipole approximiert, so ergibt sich für das Verschwinden der 2. Harmonischen:

$$\sum_i^N -3f_{\text{geo},i} \left[ p_0 + p_{1,1} \frac{H_{\text{Res},x,i}}{H_{\text{Satt}}} + p_{1,2} \left( \frac{H_{\text{Res},x,i}}{H_{\text{Satt}}} \right)^2 + \dots \right] A_0^2 \omega \sin 2\omega t \stackrel{!}{=} 0. \tag{5.25}$$

Der Ausdruck  $H_{\text{Res},x,i}$  bezeichnet dabei das Magnetfeld an der Stelle des  $i$ -ten Dipols in den lokalen Koordinaten des Dipols in  $x$ -Richtung.  $H_{\text{Res},x,i}$  leitet sich aus  $\underline{H}_{\text{Res}}$  in Gl.(5.10) durch

$$\begin{aligned}
H_{\text{Res},x,i} &= \underline{H}_{\text{Res}} \cdot \underline{e}_{l,x} \\
&= (\underline{H}_{\text{Ext}} + \underline{H}_{\text{Komp}}) \cdot \underline{e}_{l,x} \\
&= (\underline{H}_{\text{Ext}} + I_{\text{Komp}} \underline{H}_{\text{Komp},i}(\underline{p}_{\text{Dip},i})) \cdot \underline{e}_{l,x}
\end{aligned} \tag{5.26}$$

her, wobei  $I_{\text{Komp}}$  den Strom durch die Kompensationsspule beschreibt.

Abbildung 5.6 zeigt das vereinfachte Funktionsschema der Simulation wie es sich aus der bisherigen Entwicklung ergibt. Der magnetische Fluss durch das Bandmaterial im Feld der Erregerspule wird im Modell durch eine Dipolkette repräsentiert. Die Stärke der Dipole variiert mit dem Erregersignal. Das Signal in der Aufnehmerspule wird induziert durch die zeitliche Änderung der magnetischen Feldstärke der Dipole. Der magnetische Fluss durch die Aufnehmerspulenschleifen ist bestimmt durch die geometrische Lage der Dipole in Bezug auf diese. Weitere Komponenten des gezeigten Regelkreises sind der Generator des Kompensationsstroms und der Regler zur Gewinnung der 2. Harmonischen. Dieser Regler wird realisiert durch einen Algorithmus<sup>5</sup> der Gl.(5.25) nach dem Kompensationsstrom auflöst. Über die Kompensationsspulen wirkt der Kompensationsstrom auf die Dipole. An den Orten der Dipole wird so ein magnetisches Gleichfeld erzeugt, das dem an diesen Orten herrschenden äußeren Magnetfeld entgegengerichtet sein soll. Damit schließt sich der Regelkreis.

Das hier entwickelte Modell ist eine erste Näherung für die zu untersuchenden Effekte. Insbesondere schließt es keinerlei Effekte ein, die sich aus der Rückwirkung des Kernmaterials auf die Erregerspule ergeben. Ferner bleibt eine Wechselwirkung der Dipole untereinander unberücksichtigt. Dies schließt Schirmeffekte des hochpermeablen Materials ein. Es wird stillschweigend davon ausgegangen, dass diese Effekte eine untergeordnete Bedeutung haben. Eine genauere Betrachtung der Entwicklung insbesondere der Gl.(5.25) und Gl.(5.26) lässt die folgenden Eigenschaften des Modellsensors erwarten:

---

<sup>5</sup>Goldener Schnitt

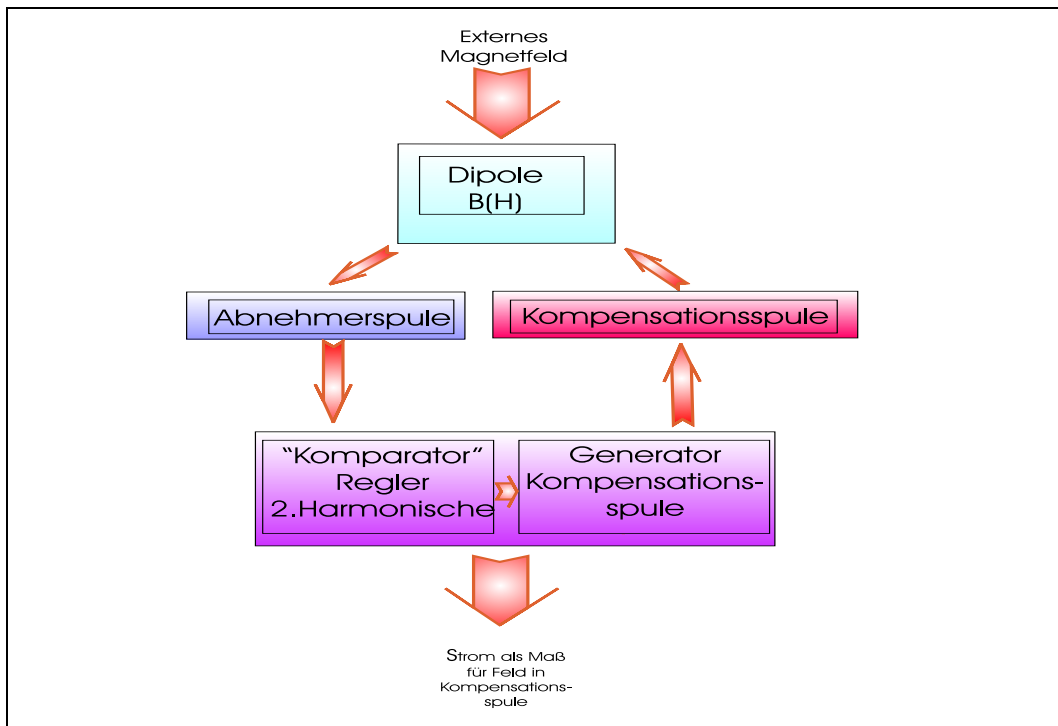


Abbildung 5.6: Funktionsschema der vereinfachten Simulation

- Wenn eine Restmagnetisierung im Ringkern vorhanden  $p_0 \neq 0$  ist, entsteht auch im Nullfeld  $H_{\text{Ext}} = 0$  eine Nullpunktverschiebung (engl. Offset).
- Die Symmetrie der Anordnung der Dipole kann gebrochen werden durch
  - Inhomogenitäten im Ringkernmaterial (im Modell repräsentiert durch unterschiedliche Dipolstärken),
  - Inhomogenitäten in der Verteilung des Kernmaterials bei Wicklung der Lagen, z.B. Überlappung des Anfangs- und Endpunkts des Materials nach der Wicklung (im Modell repräsentiert durch unterschiedliche Dipolstärken),
  - mechanische Verformung des Ringkerns (im Modell repräsentiert durch eine asymmetrische Lage der Dipole in Bezug auf die Kompensationsspule),
  - asymmetrische Lage des Ringkerns als Gesamtes in Bezug auf die Kompensationsspule (im Modell repräsentiert durch eine asymmetrische Lage der Dipole in Bezug auf die Kompensationsspule und dadurch impliziert asymmetrische Faktoren für  $f_{\text{geo}}$ ),
  - Inhomogene asymmetrische Feldverteilung im Inneren der Kompensationsspule (im Modell durch unterschiedliche  $\underline{H}_{\text{Komp},i}(\underline{p}_{\text{Dip},i})$  repräsentiert).

In diesen Fällen entstehen Änderungen in der Empfindlichkeit selbst und in der Richtungsabhängigkeit der Empfindlichkeit, aber keine Querfeldeffekte. Unter Empfindlichkeit ist in diesem Zusammenhang der Faktor zu verstehen, der das

zu messende Feld  $\underline{H}_{\text{Ext}}$  mit dem Strom durch die Kompensationsspule  $I_{\text{Komp}}$  verknüpft.

Wird ein Material mit einer „incremental permeability“ benutzt (Koeffizient  $p_{k,k} \neq 0$ ) entstehen auch nur dann Querfeldeffekte, wenn zusätzlich die Symmetrie des Kerns in Bezug auf die Aufnehmerspule und die Kompensationsspule gebrochen wird.

- Der Einfluss von Querfeldeffekten ist aus geometrischen Gründen nur aus Richtungen in der Ebene des Ringkerns zu erwarten. Die Richtung senkrecht zur Ringkernebene sollte keinerlei Querfeldeffekte zeigen.

## 6 Vergleichende Untersuchung an Magnetfeldsensoren

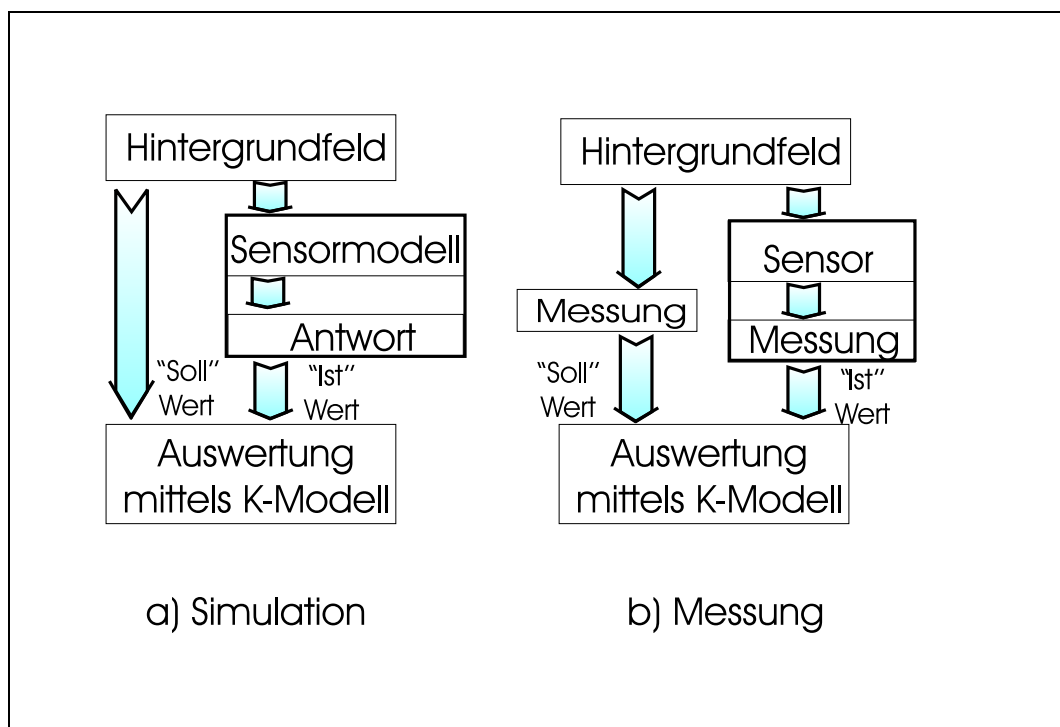


Abbildung 6.1: Vergleich einer Messung und einer Simulation (schematisch)

Weitere Überlegungen sind notwendig, um die Resultate von Messungen und Simulationen vergleichbar zu machen und um zu überprüfen, inwieweit die bei Messungen beobachteten Effekte durch das F-Modell beschreibbar sind. Abbildung 6.1 zeigt schematisch das hier angewandte Verfahren. Dabei wird ein externes Magnetfeld in a) mittels einer Simulation mit dem F-Modell auf einen „Istwert“ abgebildet, indem nacheinander für einige Hintergrundfelder die Antworten des Sensormodells generiert werden. So entsteht eine Pseudomessung, in der jeder der Kalibriervektoren aus dem durch das Hintergrundfeld direkt gebildeten „Sollwerten“ und den simulierten „Istwerten“ besteht. Bei einer Messung wie sie unter b) dargestellt wird, liefert der Sensor beziehungsweise das Magnetometer direkt mittels einer Messung den Istwert. Der Sollwert wird ebenfalls mittels einer Messung gewonnen. Sollwert und Istwert bilden zusammen wieder einen Kalibriervektor.

Im Folgenden werden Messungen und Simulationen mit dem K-Modell ausgewertet und bewertet. Dabei wird an dieser Stelle nicht näher auf die Auswahlkriterien für die Beschaffung geeigneter Kalibriervektoren, wie zum Beispiel die Wahl und Auswahl geeigneter Hintergrundfelder (siehe hierfür Abschnitt 3.7), eingegangen. Ein Einachsensensor wird im linearen K-Modell (siehe Abschnitt 3.1) bei konstanter Temperatur durch die Parameter „Offset“, „geometrische Winkel“(2x) und „Empfindlichkeit“ beschrieben. Werden diese vier Parameter mittels K-Modell bestimmt, so entsteht ein Modell, mit dem bei der Vorwärtsrechnung die Sollwerte der Kalibriervektoren korrigiert werden, um sie in die Istwerte zu überführen.

Nach Korrektur verbleibende Residuen weisen auf die Unvollständigkeit der Beschreibung hin. Nur diese Residuen, für die eine Erweiterung des K-Modells gesucht wird, sind für die folgenden Betrachtungen relevant. In diesem Kapitel werden beobachtete Effekte an einem Einzelsensor dokumentiert. Als Testobjekt dient der bereits im Abschnitt 4.4.7 und in Abbildung 5.3 vorgestellte KTB-Sensor im Weiteren „Sis“ Sensor genannt, der in einem weiteren Schritt auch mit dem F-Modell modelliert wird.

Der hier untersuchte Sensor ist aus „Ersatzteilen“ zusammengestellt, die für das KTB-Magnetometer vorgesehen waren. Da es sich um einen Experimentalsensor handelt, ist der Ringkern (noch) nicht gegen die Induktions-/Kompensationsspule fixiert. Dies lässt Untersuchungen zu, bei denen der Ringkern gedreht bzw. bewegt wird. Der Ringkern mit seiner Erregerwicklung ist eindeutig durch die Zuleitungen der Erregerwicklung markiert. Nach Aussagen der Instrumentenbauer<sup>1</sup> befindet sich an dieser Stelle eine Inhomogenitätsstelle im Kernmaterial, hervorgerufen durch die Überlappung von Anfang und Ende des hochpermeablen Bandmaterials. Die Induktions-/Kompensationsspule besteht aus zwei Kammern, deren eine 804 Windungen und deren andere 788 Windungen enthält.

Der Sensor ist an eine Analogelektronik angeschlossen, wie sie bereits in Abbildung 5.1 unter a) dargestellt wurde. Elektrische Übersprecheffekte wie sie bei einem Dreiachsensensormagnetometer unter Umständen zu erwarten sind, können in diesem Fall ausgeschlossen werden, da nur ein Kanal aktiv ist. Durch Tests an anderen Sensoren gelingt der Nachweis, dass die Elektronik linear reagiert.

Für alle Untersuchungen wird der Sensor wie in Abbildung 6.2 ausgeführt zum Referenzsystem platziert. Eine exakte Ausrichtung im mechanischen System erfolgt dabei nicht, sodass eine Schiefstellung des Sensors zur  $U$ -Achse kleiner als  $2^\circ$  in der  $UV$ -Ebene und kleiner als  $1^\circ$  in der  $UW$ -Ebene vorhanden ist. In der Zeichnung sind ebenfalls die möglichen Drehwinkel ( $0^\circ$ – $360^\circ$ ) des Ringkerns eingezeichnet. Wird der Ringkern zum Beispiel unter  $0^\circ$  platziert, so liegt die Markierung auf dem Ringkern in Richtung der  $U$ -Achse des Referenzsystems. Die Markierung am Ringkern bezeichnet auch jene Stelle, an der sich der Anfang und das Ende des Bandmaterials im Ringkern befinden, also die sogenannte „Inhomogenitätsstelle“ des Ringkerns.

Alle Messungen werden in „Magnetsrode“ (siehe auch Abschnitt 2.4 und im Anhang unter Abschnitt A) durchgeführt. Jedes externe Magnetfeld wird für etwa 10 Sekunden angelegt. Das vom Sensor registrierte Magnetfeld wird mittels eines Premas<sup>2</sup> gemessen und aufgezeichnet. Durch die schnelle Abfolge der einzelnen Messschritte kann die

<sup>1</sup>persönliche Mitteilung von Dr. Falko Kuhnke

<sup>2</sup>Ein hochgenaues Digitalvoltmeter, das ein Eingangssignal integrierend misst.

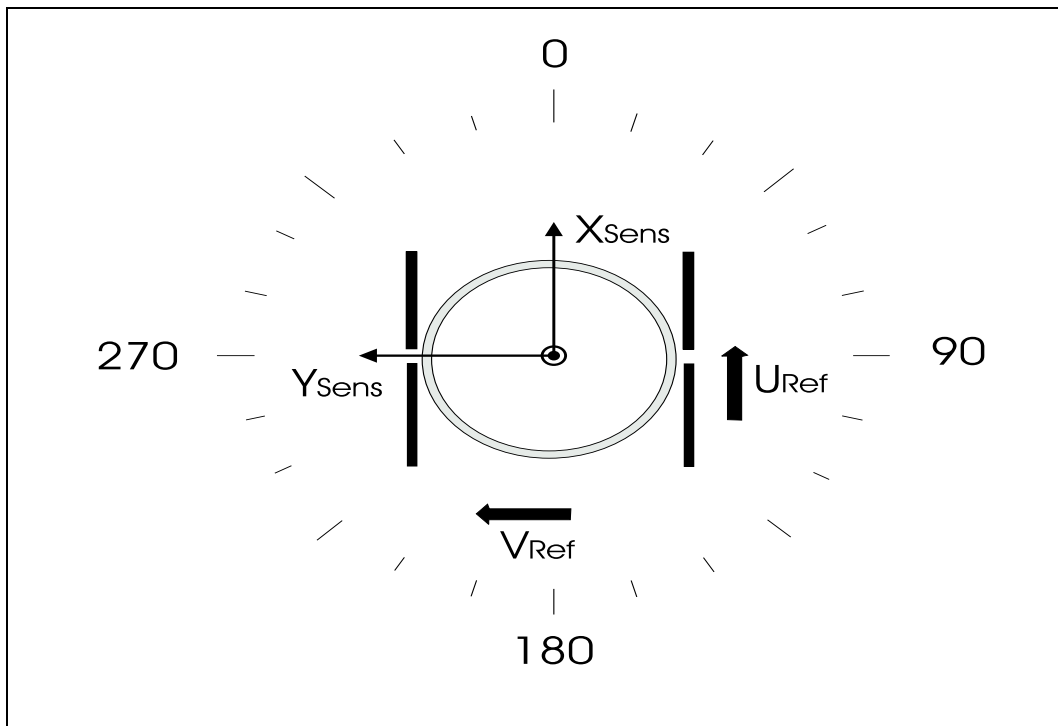


Abbildung 6.2: Lage des Einzelsensors bei den Messungen

Dauer einer Messung mit 220 Schritten auf etwa 38 Minuten begrenzt werden. Diese Geschwindigkeit hat den Vorteil, dass viele Messreihen „gefahren“ und die Stabilität der Anlage während einer Messung gewährleistet werden kann.

## 6.1 Exemplarische Auswertung einer Linearitätsmessung

Der Ringkern ist für diese Messung unter  $60^\circ$  im Spulenkörper montiert. Abbildung 6.3 illustriert den Ablauf der Messung. In den oberen drei Graphen sind die im Referenzsystem erzeugten externen Magnetfelder als Komponenten der Kalibriervektoren<sup>3</sup> über der Zeit aufgetragen. An dieser Darstellung wird deutlich, dass bei dem Typ der Linearitätsmessung immer nur eine Komponente des Referenzfeldes zur Zeit variiert wird. Der vierte Graph zeigt die Antwort des Sensors. Schon an dieser Abbildung wird deutlich, dass sich der Sensor „falsch“ herum im Referenzsystem befindet, so dass sich ein negatives Vorzeichen der Empfindlichkeit ergibt. Nach Auswertung mit dem linearen K-Modell ergeben sich für den Sensor die folgenden Parameter:

<sup>3</sup>Wie sie gewonnen werden, ist in Kapitel 2 dargestellt.

Offset und Restfeld:	267.9 nT
Empfindlichkeit:	-0.997633 nT/nT
Drehung zur $U$ Achse:	$0^\circ 42' 46.7''$
Drehung zur $V$ Achse:	$90^\circ 42' 42.3''$
Drehung zur $W$ Achse:	$90^\circ 2' 29.7''$

Die Restfelder des linearen Modells werden im ersten Graphen der Abbildung 6.4 gezeigt. Anpassungen einer nichtlinearen Empfindlichkeit unter Verwendung von Gl.(4.24) mit  $N = 5$  liefern die im 2. Graphen gezeigten Restfelder. Wird der Ansatz einer nichtidealen Richtungsempfindlichkeit gewählt, wobei  $N = 0$ ,  $e_0 = 1.0$ ,  $M_1, M_2, M_3 = 5$  in Gl.(4.25) gesetzt werden, so ergeben sich die im 3. Graphen gezeigten Restfelder. Damit wird allerdings das unter 4.2.4 geforderte Verhältnis von Messungen zu Parametern deutlich unterschritten. Ein Minimalmodell findet sich unter Verwendung der Koeffizienten  $g_{11}$ ,  $g_{21}$  bis  $g_{25}$  und  $g_{31}$ , dessen Restfelder im 4. Graphen gezeigt werden. Alle Anpassungen erfolgen in den neuen Koeffizienten (siehe auch Abschnitt 4.2.4). Eine genauere Betrachtung zeigt, dass Nichtlinearitäten nur im Zusammenhang mit Feldern aus der  $V$ -Komponente auftreten. Aus diesem Grund erweist sich eine Auftragung der Restfelder über der  $V$ -Komponente als sinnvoll. Abbildung 6.5 zeigt das entsprechende Bild.



## 6.1 Exemplarische Auswertung einer Linearitätsmessung

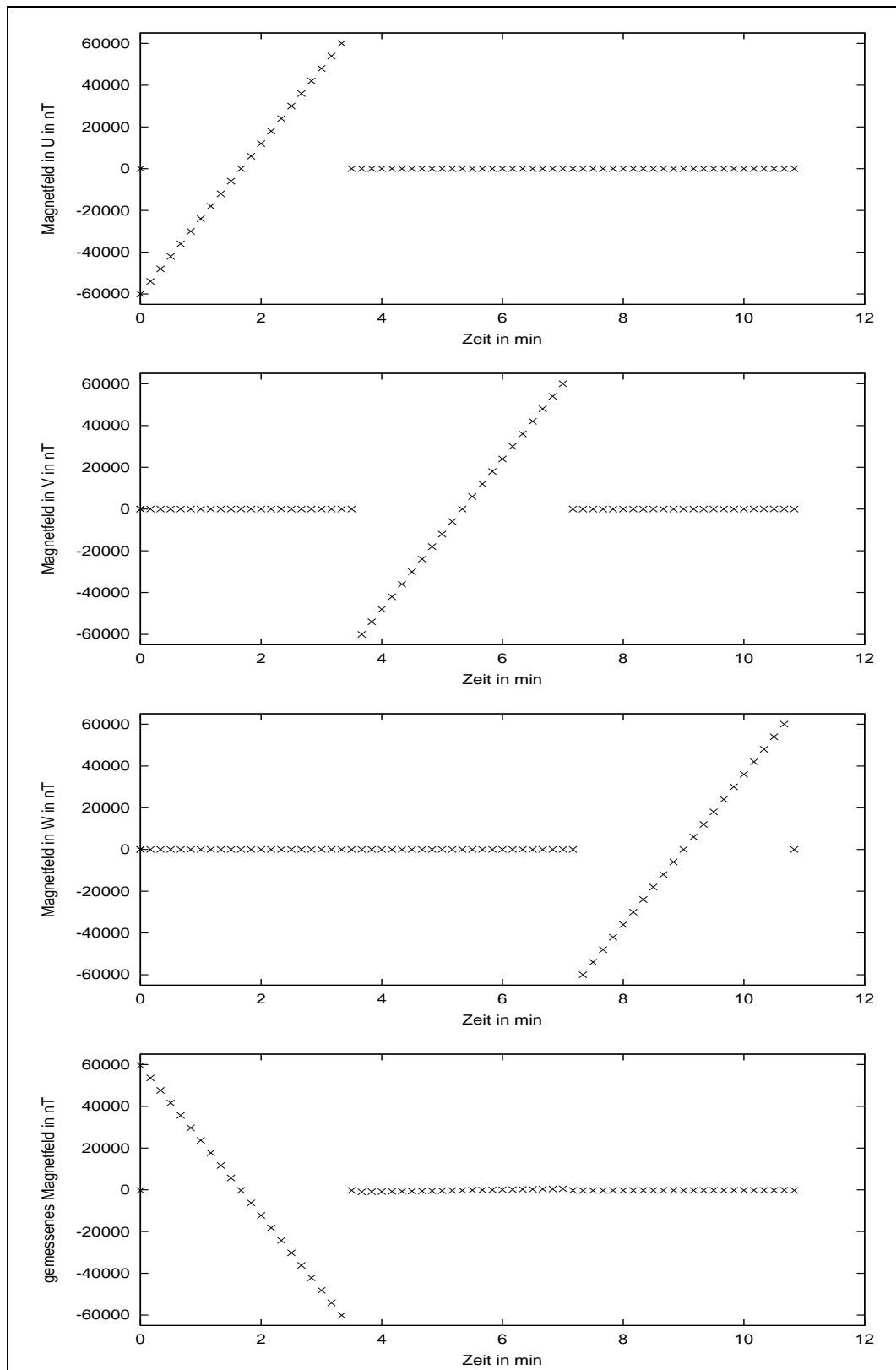


Abbildung 6.3: Linearitätsmessung am Einzelsensor. Komponenten der Kalibriervektoren aufgetragen über der Zeit.

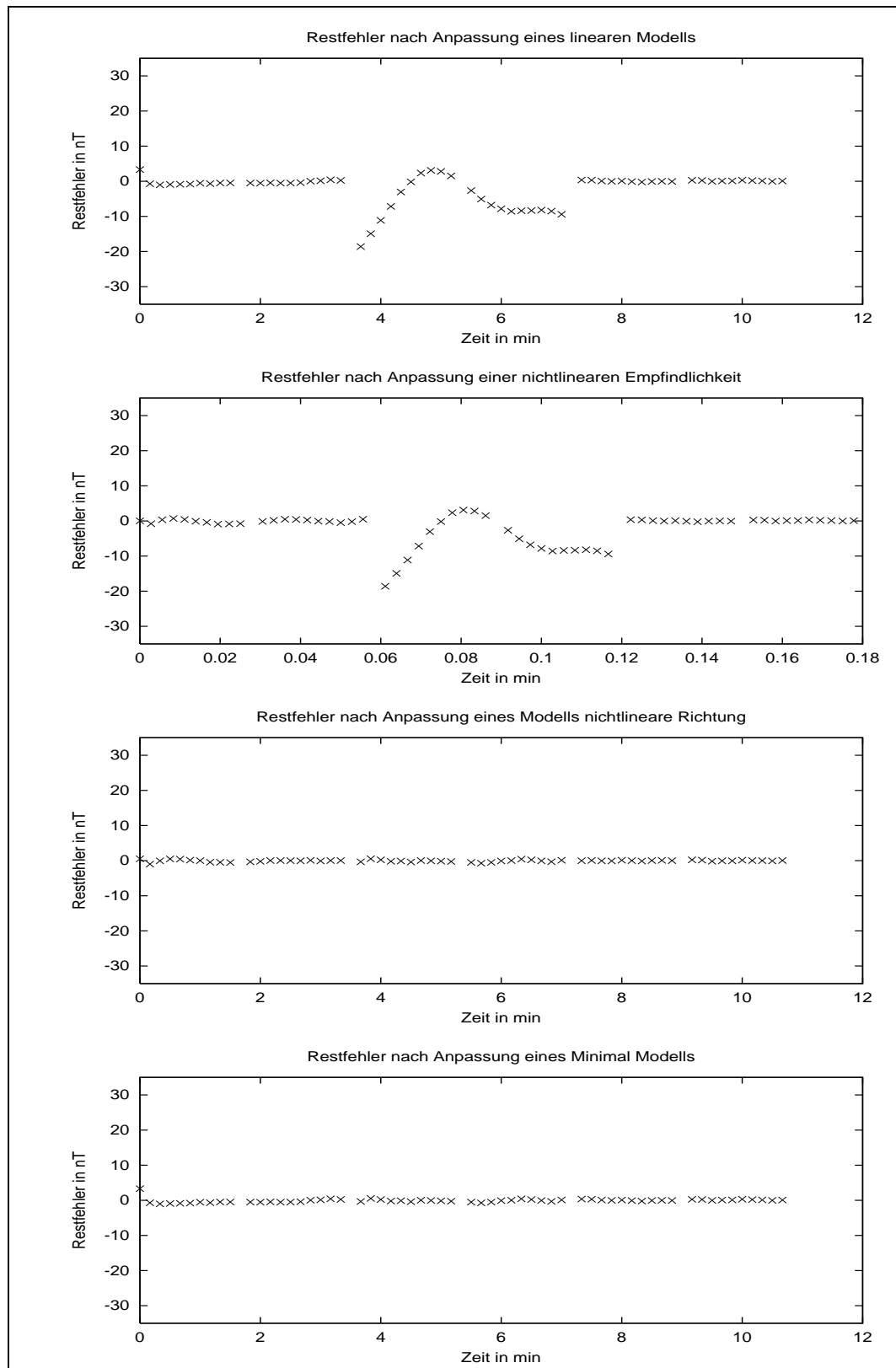


Abbildung 6.4: Linearitätsmessung; Restfelder nach Anpassung verschiedener Modelle über der Zeit

## 6.1 Exemplarische Auswertung einer Linearitätsmessung

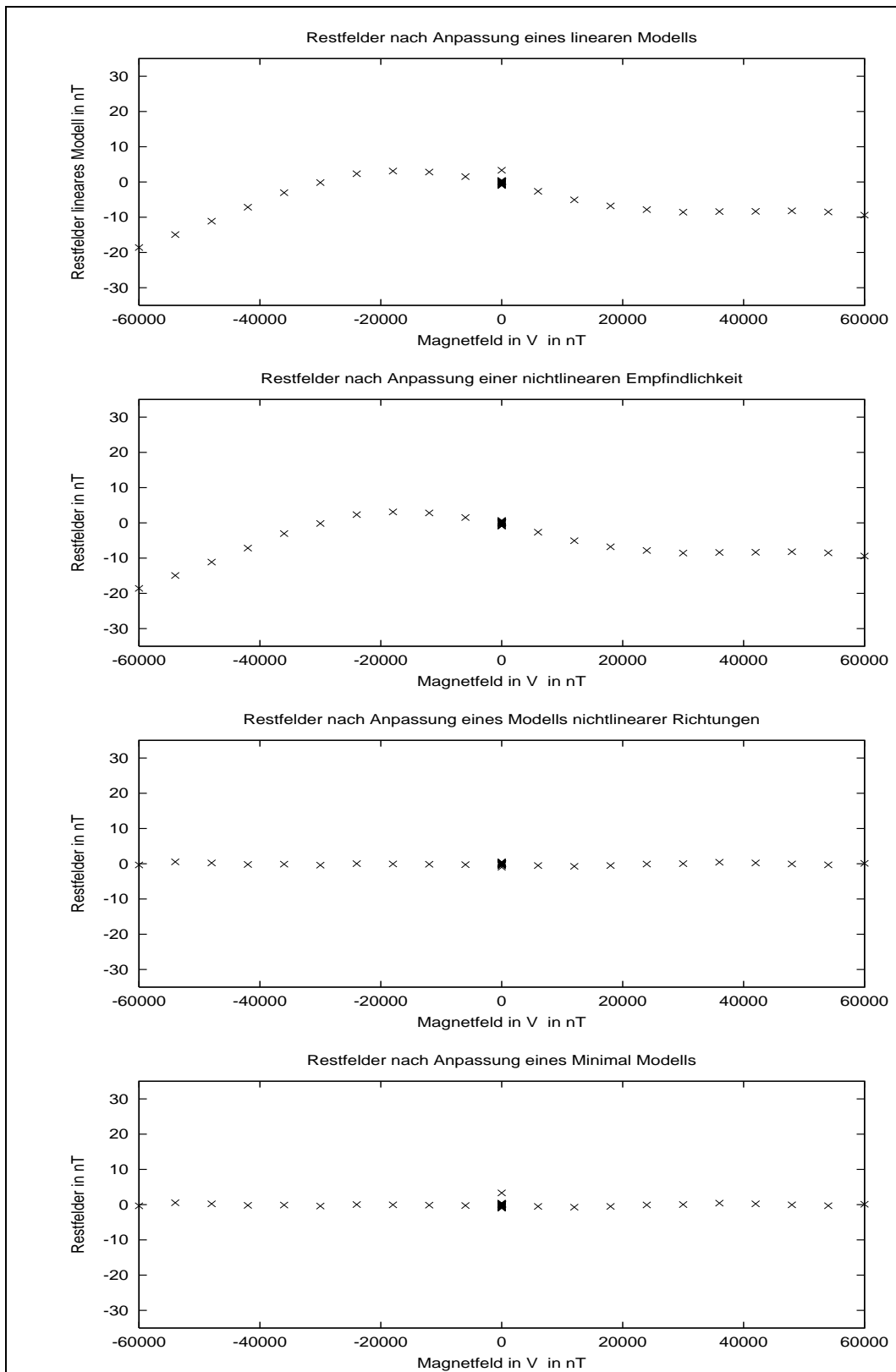


Abbildung 6.5: Linearitätsmessung; Restfelder nach Anpassung verschiedener Modelle über  $v_{\text{Ref}}$

## 6.2 Beispiel der Bestimmung eines Minimal-Modells

Der Sensor wird im Laborsystem analog Abbildung 6.2 platziert. Der Ringkern ist unter  $0^\circ$  im Sensor montiert. Das Messprogramm besteht aus insgesamt  $25 * 25 * 25 = 15625$  Messschritten, die im *UVW* System der Anlage nach folgendem Algorithmus angelegt werden:

1.  $i, j, k = 0$
2. Schleife solange  $i \leq 24$
3. Schleife solange  $j \leq 24$
4. Schleife solange  $k \leq 24$
5.  $b_u := -60000 + i * 5000 \text{ nT}$   
 $b_v := -60000 + j * 5000 \text{ nT}$   
 $b_w := -60000 + k * 5000 \text{ nT}$
6.  $k := k + 1$ ;
7. Ende Schleife  $k$
8.  $j := j + 1$ ;  $k = 0$
9. Ende Schleife  $j$
10.  $i := i + 1$ ;  $j = 0$
11. Ende Schleife  $i$

So entsteht ein kubisches Gitter auf  $b_u, b_v, b_w$  zwischen  $-60000$  und  $60000 \text{ nT}$  mit dem Abstand von  $5000 \text{ nT}$  auf den Achsen zwischen zwei Punkten. Die Gesamtmesszeit bewegt sich bei einer 10 sekundigen Dauer eines Einzelschrittes in der Größenordnung von zwei Tagen. Um die Stabilität der Anlage in dieser Zeit zu kontrollieren, werden die in der Anlage gesetzten Magnetfelder gleichzeitig mit einem zweiten Dreiachsomagnetometer dem sogenannten „Zopf Mag“ aufgezeichnet.

Folgt man der Argumentation aus Abschnitt 4.2.3 und nimmt o.B.d.A. an, dass es sich bei dem Sensor um einen der in die X-Richtung messenden Sensor handelt, so ergibt sich das mit dem Sensor gemessene Magnetfeld  $b_x$  zu :

$$b_x = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N a_{ijk} b_u^i b_v^j b_w^k.$$

Bei Annahme einer maximalen Ordnung  $N = 5$  stehen somit 216 Koeffizienten für die Anpassung zu Verfügung. Minimal werden die 3 linearen Koeffizienten  $a_{100}, a_{010}$  und  $a_{001}$  für eine Anpassung benötigt. Auf der Suche nach dem am besten angepassten Modell, ergibt sich das in Tabelle 6.1 gezeigte Bild. Neben der Anzahl sind die

Zahl der Koeff.	Indices der für das Modell verwendeten Koeffizienten																Summe der Residuen	Max. Residuum		Diff. $R_+ - R_-$	Mittelwert über alle Residuen	Std Abwei- chung
	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		$R_-$	$R_+$			
	0	1	0	2	3	4	5	4	5	0	0	0	0	0	0	0		$R_-$	$R_+$			
3	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22320320.4	-17.53	10.48	28.01	-1.35	6.36
4	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110718.8	-10.53	6.35	16.87	0.16	1.72
5	X	X	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	23074.4	-4.25	2.97	7.22	-0.14	1.16
6	X	X	X	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	12225.9	-3.94	2.70	6.63	-0.14	0.98
7	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	10571.3	-3.86	2.53	6.40	-0.10	0.95
8	X	X	X	X	X	-	-	X	-	X	-	-	-	-	X	-	8250.0	-3.26	2.69	5.96	-0.07	0.90
9	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-	-	-	-	X	-	7509.1	-3.18	2.54	5.72	-0.05	0.88
10	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	-	-	-	X	-	6687.3	-3.28	2.13	5.41	-0.05	0.85
11	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	-	6507.9	-3.24	2.14	5.39	-0.05	0.85
12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	6197.1	-3.14	2.20	5.34	-0.04	0.84
13	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	6063.0	-3.14	2.18	5.32	-0.03	0.83
216	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	5096.5	-2.58	2.02	4.60	0.00	0.80

Tabelle 6.1: Übersicht über die ermittelten am besten angepassten Koeffizienten beim Minimal-Modell

verwendeten Koeffizienten auch einzeln in der zweiten Spalte aufgeführt. So bedeutet beispielsweise „410“ den Koeffizienten  $a_{410}$ , der zu  $b_u^4 b_v$  gehört. In der dritten Spalte ist die Summe der Residuenquadrate der jeweiligen Anpassung dargestellt. Hierbei handelt es sich um keinen allgemein gültigen Parameter, da er von der Auswahl der Messungen direkt abhängig ist. Er illustriert in diesem Zusammenhang das Ergebnis der einzelnen Anpassungen.

In den weiteren Spalten sind die für die Anwendung wichtigeren Parameter, wie die maximale negative und positive Abweichung  $R_-$ ,  $R_+$  und die Standardabweichung der Restfelder aufgetragen. Hierbei zeigt sich, dass eine Übertragungsfunktion, die aus Sicht der Größe der Standardabweichung das best angepasste Modell erzeugt, bereits durch 6 Koeffizienten repräsentiert werden kann. Dabei werden allerdings Terme mit gemischten Koeffizienten verwendet<sup>4</sup>. Da hierbei nur Koeffizienten eine Rolle spielen, in denen  $u$ - und  $v$ -Komponenten auftreten, lokalisiert sich der zu beschreibende Effekt in der  $UV$ -Ebene des Spulensystems bzw. der  $XY$ -Ebene des Sensors unter Berücksichtigung der geometrische Lage des Sensors. Die  $XY$ -Ebene entspricht im Sensor der Ebene des Ringkerns. Desweiteren zeigt sich der Ansatz mit Polynomen zur Beschreibung des Verhaltens eines Einzelsensors als ausreichend, sofern keinerlei Effekte auftreten, die durch die Bandbreitenbegrenzung der Messung nicht erfasst werden<sup>5</sup>. Einer feineren Diskretisierung steht ein deutlich höherer Zeitaufwand bei den Messungen gegenüber.

### 6.3 Spike–Sphere–Messungen

Bei der Spike–Sphere–Messung handelt es sich um eine Messung, die einen Kompromiss darstellt zwischen der im Falle des Auftretens nichtlinearer Koeffizienten unter Umständen unzureichenden Linearitätsmessung aus Abschnitt 6.1 und der extrem zeitaufwendigen Messung zur Bildung eines Minimalmodells 6.2. Eine ausführliche Darstellung der Spike–Sphere–Messung findet sich im Abschnitt 3.7.

Als Beispiel der Anwendung einer Spike–Sphere–Messung wird eine Messung gezeigt, bei der der Ringkern unter  $45^\circ$  im Spulenkörper montiert ist. Abbildung 6.6 illustriert das Resultat der Messung. In den oberen drei Graphen sind die im Referenzsystem erzeugten externen Magnetfelder dargestellt. Der vierte Graph zeigt die Antwort des Einzelsensors. Im linearen K–Modell ergeben sich die folgenden Parameter für den Sensor:

Offset und Residualfeld: 264.9 nT  
 Empfindlichkeit: -0.997670863 nT/nT  
 Drehung zur  $U$  Achse:  $0^\circ 45' 46.6''$   
 Drehung zur  $V$  Achse:  $90^\circ 42' 6.2''$   
 Drehung zur  $W$  Achse:  $90^\circ 17' 57.8''$

Wie bereits im Abschnitt 6.1 vorgeführt wurde, werden die Restfehler nach der An-

<sup>4</sup>Die Verwendung von Termen mit gemischten Koeffizienten ist ein Zeichen dafür, dass sich die Umweltbedingungen in der Anlage im Laufe der Messung leicht verändert haben. Die ist zum Teil auf die Abfolge der geschalteten Felder zurückzuführen. Die  $u$ -Komponente des Referenzsystems des Laborsystems erwärmt sich auf Grund der großen Ströme, die über einen längeren Zeitraum zur Erzeugung der Magnetfelder geschaltet werden müssen.

<sup>5</sup>wie z.B. eine lokale Nichtlinearität zwischen 3000 und 4000 nT in einer beliebigen Richtung.

passung über den in der  $V$ -Komponente angelegten Feldern dargestellt. Insgesamt werden 219 Felder angelegt.

Nach der Anpassung eines  $K$ -Modells ergeben sich die im ersten Graphen der Abbildung 6.7 gezeigten Residuen für die Verwendung der linearen Koeffizienten. Anpassungen nach dem Ansatz einer nichtlinearen Empfindlichkeit unter Verwendung von 4.24 mit  $N = 5$  liefern die im zweiten Graphen gezeigten Restfehler. Wird der Ansatz einer nichtidealen Richtungsempfindlichkeit gewählt, wobei  $N = 0$ ,  $e_0 = 1.0$ ,  $M_1, M_2, M_3 = 5$  in Gleichung 4.25 gesetzt werden, so ergeben sich die im dritten Graph gezeigten Restfehler. Im vierten Graphen sind schließlich die Restfelder des Minimalmodells unter Verwendung der Koeffizienten  $g_{11}$ ,  $g_{21}$  bis  $g_{25}$  und  $g_{31}$  gezeigt.

Es zeigt sich erneut, dass zur Beschreibung des „Sis“-Sensors ein Modell benötigt wird, das Komponenten aus der nichtidealen Richtungsempfindlichkeit benötigt. Desweiteren lassen sich auch noch immer Strukturen in den Restfelder entdecken, die darauf hindeuten, dass das Modell das Verhalten des Sensors noch nicht vollständig beschreibt.

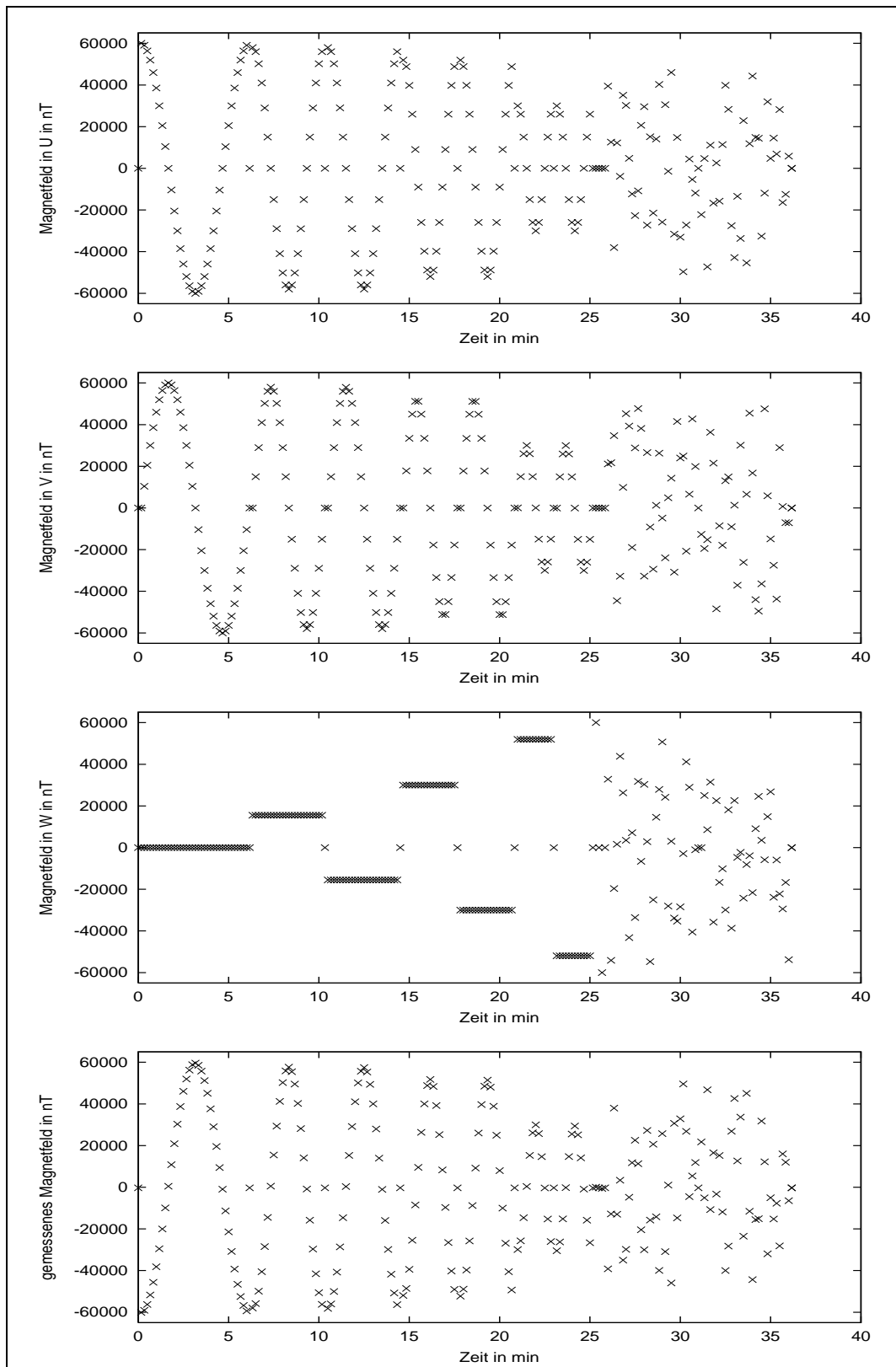


Abbildung 6.6: Spike-Sphere-Messung am Einzelsensor. Komponenten der Kalibriervektoren aufgetragen über der Zeit.



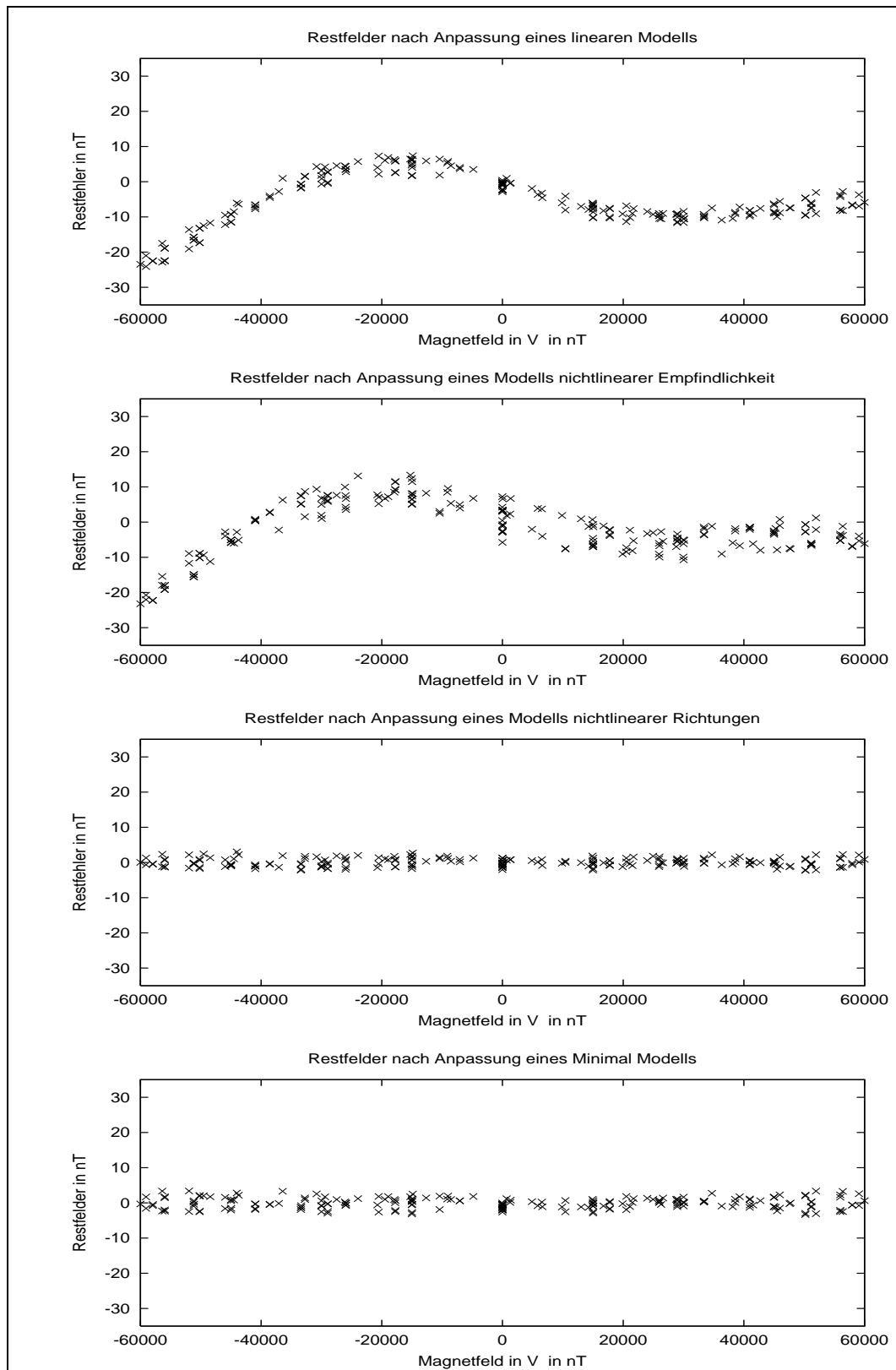


Abbildung 6.7: Spike-Sphere-Messung; Restfehler nach Anpassung verschiedener Modelle über  $v_{\text{Ref}}$

## 6.4 Der Einfluss der Lage des Ringkerns

In Tabelle 6.2 auf Seite 126 befindet sich eine Aufstellung mit weiteren Resultaten aus Messungen an dem Einzelsensor „Sis“. In Spalte 1 der Tabelle ist eine laufende Nummer eingetragen. Sie dient der Identifizierung der Messung. Das „L“ hinter der Nummer bezeichnet die ausschließliche Verwendung der linearen Anpassung zur Bestimmung der Instrumentenparameter. Im Falle eines „H“ („H“ für Modell höherer Ordnung) hinter der laufenden Nummer werden zusätzlich Koeffizienten nichtlinearer Terme verwendet. Die in der Tabelle angegebenen Parameter beziehen sich jedoch immer auf die linearen Koeffizienten.

Spalte 3 und 4 fixieren den Startzeitpunkt der Messung. Spalte 5 beinhaltet die berechnete lineare Empfindlichkeit. Die ermittelte Lage des Sensors zum Referenzsystem ist in den Spalten 6–8, eine statistische Auswertung der Restfelder nach der Anpassung in den Spalten 9–12 dargestellt. Spalte 13 zeigt schließlich die zur Zeit der Messung im Laborsystem gemessene Temperatur.

Im Rahmen dieser Aufstellung lassen sich die folgenden Effekte diskutieren:

- Wird der Sensor mechanisch nicht bewegt (Nr. 7–15) so lassen sich seine Parameter bei jeder Modellierung auf  $10^{-5}$  reproduzieren. Dies entspricht der erwarteten Genauigkeit.
- Ebenso übt die Variation der Temperatur von ca.  $0.5^\circ \text{C}$  im Laufe dieser Messungen keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Modellparameter aus.
- Wird der Sensor mechanisch bewegt, gelingt eine Reproduzierbarkeit der Lage des Sensors auf ca. 10 Bogenminuten genau. Damit bewegen sich alle beobachteten Änderungen der geometrischen Lage des Sensors bei Drehung des Ringkerns innerhalb dieser Toleranz. D.h. ein Effekt, der durch die Drehung des Ringkerns verursacht wird und auf die ermittelte geometrische Lage wirkt, kann nicht nachgewiesen werden.
- Insbesondere kann eine Änderung der linearen Empfindlichkeit des Sensors bedingt durch die Drehung des Ringkerns nachgewiesen werden.
- Anhand der Standardabweichung, berechnet aus den Restfeldern nach einer Anpassung eines linearen Modells, lässt sich zeigen, dass eine Anpassung in den Regionen um  $0^\circ$  und  $90^\circ$  besser gelingt als im Bereich von  $45^\circ$ .

Der Einfluss der Lage des Ringkerns auf die Residuen nach einer linearen Anpassung ist in Abbildung 6.14 dokumentiert. An dieser Stelle wird der Einfluss der Koeffizienten höherer Ordnung auf die Residuen einer Anpassung wie folgt dargestellt:

Abbildung 6.8 zeigt die Richtungsabhängigkeit eines idealen Sensors, der in seiner  $X$ -Richtung empfindlich ist, also in der  $UV$ -Ebene des Laborsystems (Ebene des Ringkerns).

Angelegt wird hierbei ein Magnetfeld mit konstantem Betrag von 60000 nT aus verschiedenen Richtungen der  $UV$ -Ebene. Der Graph zeigt die Antwort des Sensors auf diese Felder. Neben einer Empfindlichkeit, die hier idealerweise mit 1.0 angenommen wird, spielt nur der Winkel zwischen der Empfindlichkeitsrichtung des Sensors

und des angelegten Feldes eine Rolle (Abbildung 6.8 Mitte). Auf Grund des großen Messbereiches und der im Vergleich hierzu sehr kleinen Fehler ist eine Darstellung der Differenzen zwischen der idealen Übertragungsfunktion und dem gemessenen Signal sinnvoll. Abbildung 6.8 unten zeigt die Richtungsabhängigkeit eines der untersuchten Sensoren. Hierbei sind die Differenzen zwischen der idealen und der real vermessenen Übertragungsfunktion dargestellt.

So entsteht eine Figur, die den Anteil der Koeffizienten höherer Ordnung repräsentiert. Der Unterschied zwischen dem idealen und dem realen Verhalten ist in der Größenordnung von etwa 15 nT, wobei ein Unterschied besteht, ob der Sensor das Feld aus der  $-V$ - oder  $+V$ -Richtung „sieht“.

Im Folgenden wird der Einfluss der Inhomogenitätsstelle bei seiner Drehung um die Zentralachse visualisiert. Dazu werden die Messungen mit den Nummern 1, 4, 5, 6, 7, 18, in Tabelle 6.2 benutzt. Abbildung 6.9 zeigt das Ergebnis. Deutlich wird in dieser Abbildung der Einfluss, den die Inhomogenitätsstelle auf die Richtungsempfindlichkeit hat, illustriert.

Mit den Pfeilen in Abbildung 6.9 ist die Lage der Inhomogenitätsstelle markiert. Abbildung 6.9 zeigt die Drehung der Inhomogenitätsstelle in einem Quadranten. Für die Winkel  $-15$  Grad,  $-30$  Grad, usw. ergibt sich eine gespiegelte Abhängigkeit, d.h. alle Abbildungen können an der  $U$ -Achse gespiegelt werden, um die Residuen bei Drehung der Inhomogenitätsstelle in entgegengesetzter Richtung zu erhalten. Dies ist bereits ein starker Hinweis darauf, dass Abschirmeffekte bei der Beschreibung des nichtlinearen Querfeldeffekts eine Rolle spielen.

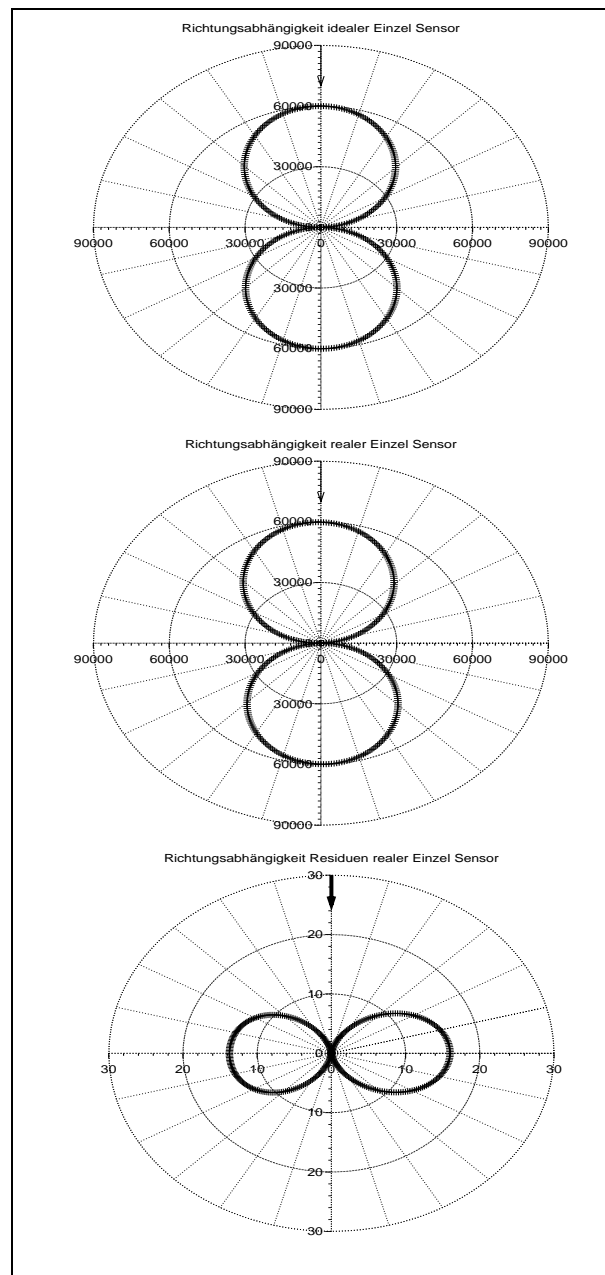


Abbildung 6.8: Oben: Ideale Richtungsabhängigkeit eines Einzelsensors; Mitte: Richtungsabhängigkeit eines realen Einzelsensors; Unten: Differenz

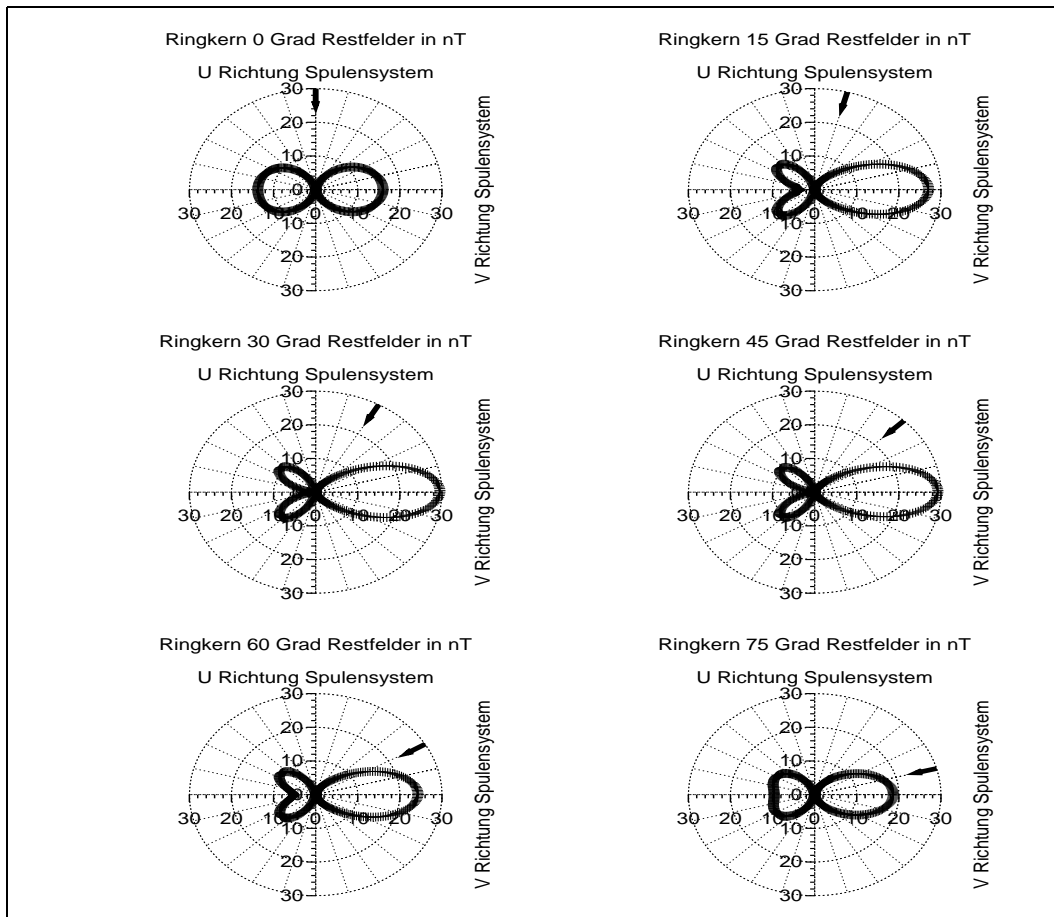


Abbildung 6.9: Einfluss der Lage des Ringkerns auf die nichtlineare Empfindlichkeit

Nr.	Ring- kern- lage	Datum Tag/ Monat	Start- zeit	Empfind- lichkeit	Winkel der Sensorachse in Grad, Bogenmin., Bogensek.			Restfelder nach Anpassung in nT				Temp. in ° C
					U-Achse	V-Achse	W-Achse	Mittel	STD	Min	Max	
1L	00	03/06	13:25:32	-0.9974123	1 ° 4' 32.0"	91 ° 0' 33.8"	90 ° 22' 17.0"	-5.4	+4.6	-16.3	+1.5	+13.44
2L	00	05/06	11:41:32	-0.9973683	1 ° 3' 5.4"	90 ° 59' 10.9"	90 ° 21' 51.5"	-6.0	+4.8	-16.6	+1.5	+13.62
3H	00	05/06	11:41:32	-0.9973711	1 ° 3' 14.7"	90 ° 59' 20.6"	90 ° 21' 52.0"	-0.2	+1.4	-3.4	+3.2	
4L	15	05/06	10:57:23	-0.9974339	0 ° 54' 37.3"	90 ° 49' 52.9"	90 ° 22' 15.3"	-6.0	+6.6	-23.1	+6.5	+13.68
5L	30	03/06	07:08:05	-0.9976209	0 ° 46' 13.5"	90 ° 45' 27.7"	90 ° 8' 22.2"	-5.7	+7.2	-24.2	+7.2	+13.06
6L	45	05/06	10:12:24	-0.9976708	0 ° 45' 46.6"	90 ° 42' 6.2"	90 ° 17' 57.8"	-5.4	+7.1	-24.1	+7.3	+13.78
7L	60	02/06	14:59:56	-0.9976180	0 ° 42' 50.6"	90 ° 42' 47.0"	90 ° 2' 15.0"	-5.5	+5.8	-20.8	+5.2	+12.73
8L	60	02/06	17:34:50	-0.9976141	0 ° 42' 48.3"	90 ° 42' 44.5"	90 ° 2' 20.2"	-5.3	+5.7	-20.4	+5.0	+12.88
9L	60	02/06	18:13:35	-0.9976173	0 ° 42' 47.6"	90 ° 42' 43.7"	90 ° 2' 22.0"	-5.3	+5.7	-20.4	+5.1	+12.94
10L	60	02/06	19:31:04	-0.9976245	0 ° 42' 46.9"	90 ° 42' 42.8"	90 ° 2' 24.8"	-4.9	+5.7	-20.5	+4.4	+13.06
11L	60	02/06	20:09:44	-0.9976263	0 ° 42' 46.7"	90 ° 42' 42.5"	90 ° 2' 26.2"	-4.7	+5.7	-20.6	+4.5	+13.11
12L	60	02/06	20:48:29	-0.9976264	0 ° 42' 46.8"	90 ° 42' 42.6"	90 ° 2' 27.0"	-4.5	+5.7	-20.4	+4.7	+13.14
13L	60	02/06	21:27:14	-0.9976255	0 ° 42' 46.4"	90 ° 42' 42.2"	90 ° 2' 28.0"	-4.3	+5.7	-20.2	+4.9	+13.17
14L	60	02/06	22:05:58	-0.9976238	0 ° 42' 46.0"	90 ° 42' 41.7"	90 ° 2' 28.9"	-3.9	+5.7	-19.5	+6.0	+13.18
15L	60	02/06	22:44:43	-0.9976222	0 ° 42' 45.5"	90 ° 42' 41.1"	90 ° 2' 29.1"	-3.6	+5.6	-18.7	+6.8	+13.18
16L	60	24/06	10:30:19	-0.9977145	0 ° 52' 10.6"	90 ° 50' 9.9"	90 ° 14' 20.6"	-9.6	+6.8	-26.2	+2.0	+13.79
17L	60	29/06	11:25:22	-0.9977126	0 ° 52' 44.1"	90 ° 50' 14.2"	90 ° 16' 2.1"	-8.5	+6.3	-23.9	+5.1	+14.01
18L	75	05/06	09:30:08	-0.9978496	0 ° 49' 47.4"	90 ° 47' 32.9"	90 ° 14' 46.1"	-5.5	+4.8	-17.6	+2.6	+14.04
19L	330	05/06	06:31:34	-0.9973629	1 ° 13' 16.9"	91 ° 10' 35.2"	90 ° 19' 41.3"	-4.7	+7.3	-24.1	+8.1	+13.25
20L	300	05/06	07:13:54	-0.9976388	1 ° 7' 31.3"	91 ° 4' 46.1"	90 ° 19' 4.8"	-4.9	+5.3	-19.6	+4.4	+13.24
21L	270	05/06	07:56:34	-0.9974525	0 ° 53' 59.1"	90 ° 50' 26.6"	89 ° 40' 46.2"	-5.4	+4.2	-15.1	+5.6	+13.28
22L	270	05/06	08:35:33	-0.9974545	0 ° 54' 0.4"	90 ° 50' 27.5"	89 ° 40' 44.9"	-5.1	+4.2	-15.2	+1.6	+13.28

Tabelle 6.2: Übersicht ermittelter Parameter am „Sis“ Einzelsensor I

## 6.5 Messungen an verschiedenen Einachsmagnetometern

Alle bisher gezeigten Auswertungen beziehen sich auf den „Sis“ Sensor; also auf ein einziges Individuum. Um eine Idee davon zu bekommen, wie sich Sensoren verschiedener Hersteller verhalten, werden vier Individuen (siehe auch Abschnitt 4.4.7 – 4.4.10) nacheinander an dieselbe Elektronik geschaltet und untersucht. Hierbei ergeben sich die in Abbildung 6.10 gezeigten Ergebnisse. Wieder sind die Residuen nach Anpassung der Spike–Sphere–Messung aus Abbildung 6.6 mit einem linearen Modell über dem Magnetfeld  $B_v$  des Referenzsystems aufgetragen. Es zeigt sich, dass jedes Individuum der Einzelsensoren seine ihm typische Charakteristik in den Restfeldern nach der Anpassung aufweist. Eine Querfeldbeeinflussung ist hierbei für den Sensor „Sisb“ nicht nachweisbar. Der Sensor „Sisc“ zeigt hingegen eine Querfeldbeeinflussung, die fast doppelt so groß ist, wie die des „Sis“. Eine weitere ausführliche Diskussion erfolgt in Kapitel 6.8.

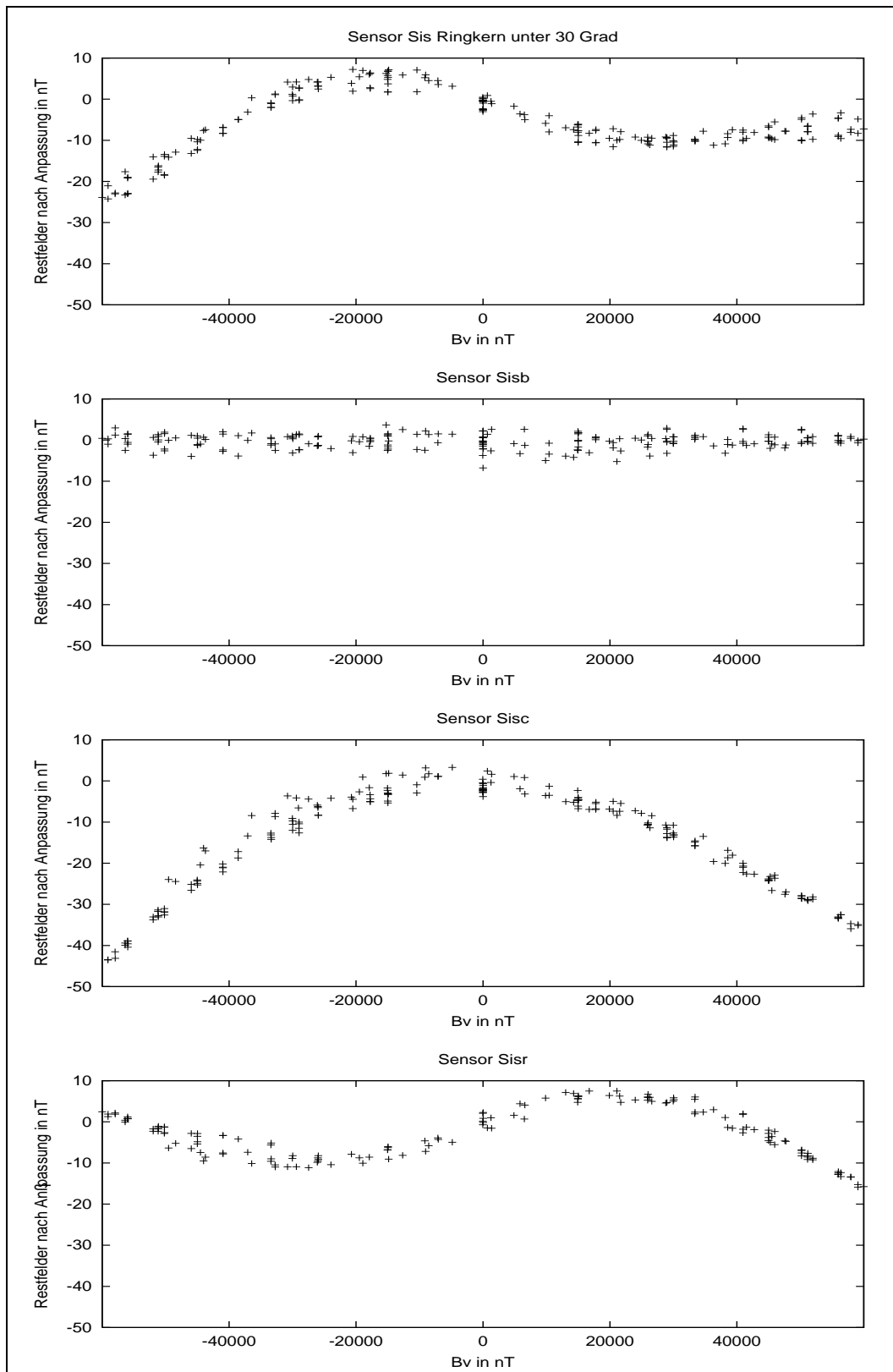


Abbildung 6.10: Spike-Sphere-Messung; Restfelder nach Anpassung verschiedener Sensoren über dem Magnetfeld in Richtung  $v_{\text{Ref}}$



## 6.6 Der Einfluss von Gradienten über der Messzelle

Normalerweise wird ein Magnetometer bei einer Kalibrierung unter idealen Bedingungen betrieben. Hierzu gehört zum Beispiel auch, dass der Sensor innerhalb einer homogenen Feldkonfiguration des Laborsystems arbeitet. Im Feldeinsatz hingegen wird der Sensor auch in äußeren Feldkonfigurationen eingesetzt, bei denen es zu Feldgradienten über seiner Messzelle kommt. Um einen Eindruck davon zu gewinnen, wie ein Ringkern-Fluxgate-Magnetometer auf Gradienten über seiner Messzelle reagiert, wird eine kleine Versuchsreihe durchgeführt.

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, den Sensor einem wohl definierten Feldgradienten auszusetzen. Zum einen kann eine Spule verwendet werden, deren geometrische Abmessungen, Windungszahl und Strom genau bekannt sind. Dem Vorteil, dass mittels einer Stromänderung innerhalb der Spule die Größe der Feldgradienten variiert werden kann ohne die Lage der Spule ändern zu müssen, steht der Nachteil gegenüber, den die Verwendung einer aktiven Baugruppe als zusätzliche Fehlerquelle<sup>6</sup> birgt. Zum anderen besteht die Möglichkeit, einen genau bekannten magnetischen Dipol zur Erzeugung der Feldgradienten zu verwenden. Hierbei steht dem Nachteil, ein statisches System zur Erzeugung zu verwenden, der Vorteil einer einfachen Handhabung der „Gradientenquelle“ bei den Experimenten gegenüber.

Um die Handhabung und Deutung der Experimente nicht unnötig zu erschweren, wird ein Stabmagnet Dipol mit den Abmessungen von 1 cm Länge und einem Durchmesser von etwa 0.2 cm verwendet. Vor seiner Vermessung zur Bestimmung seines magnetischen Momentes wird er auf einem Stück Papier fixiert. Dies geschieht auch vor dem Hintergrund der Reproduzierbarkeit der Messungen, da ein Magnet zwar typischerweise entlang seiner Längsachse magnetisiert wird, es aber immer dazu kommt, dass die Hauptachse der Magnetisierung um ein paar Grad von der Längsachse des Magneten abweicht.

Bei der Vermessung<sup>7</sup> wird das Hauptmoment des Magneten zu  $42 \text{ mAm}^2$  bestimmt. Für die eigentliche Untersuchung wird wieder der „Sis“ Sensor mit einem Ringkern unter  $60^\circ$  Drehung verwendet. Der Sensor wird im Zentrum des Spulensystems so platziert, dass sein geometrisches Zentrum auf der  $W$ -Achse liegt und seine Messrichtung

<sup>6</sup>Hier ist zum Beispiel der magnetische Einfluss zu nennen, den die Zuleitungskabel der Spule auf das Magnetometer ausüben. Innerhalb der hier betrachteten kleinen Abmessungen gelingt es häufig nur mit großem Aufwand und manchmal auch nicht, die Zuleitungen zur Spule so genau zu verlegen, dass das von ihnen erzeugte magnetische Feld am Orte des Magnetometers vernachlässigt werden kann.

<sup>7</sup>Die Vermessung des Magneten erfolgt mittels einer Rotationsmessung, die auch bei magnetischen Reinheitsmessungen zur magnetischen Charakterisierung von Baugruppen von Satelliten eingesetzt wird. Hierzu wird der Magnet auf einem Drehtisch platziert und sein magnetisches Feld mit einem Magnetometer in einer bekannten Entfernung unter verschiedenen Winkeln vermessen. Mit dem Wissen um die geometrische Lage des Magneten in Bezug auf das Magnetometer ( $\underline{r}$  Abstandvektor vom Dipolmittelpunkt zum Magnetometer) kann mit Hilfe der Beziehung

$$\underline{b}(\underline{r}) = \mu_0 \frac{3(\underline{m} \cdot \underline{r}) \underline{r} - r^2 \underline{m}}{4\pi r^5}$$

das Moment  $\underline{m}$  des Magneten bestimmt werden. Weitere Erläuterungen hierzu sprengen den Rahmen dieser Arbeit. An dieser Stelle sei nur auf die einschlägigen Lehrbücher zur klassischen Elektrodynamik, wie zum Beispiel [Greiner 1991], verwiesen.

in Richtung der  $U$ -Achse zeigt. In mehreren Schritten wird der Dipol an verschiedenen Orten in der  $UV$ -Ebene platziert wobei jedesmal eine Spike-Sphere-Messung durchgeführt wird. Tabelle 6.3 zeigt die Ergebnisse, die sich nach Anpassung eines

Nr	Offset/ Restfeld in nT	Empfind.	Restfelder nach Anpassung in nT			Winkel in Grad, Bogenmin., Bogensek.			Abb.
			Min	Max	Std	$\angle[XU]$	$\angle[XV]$	$\angle[XW]$	
1	-114.50	-0.9977145	-26.3	2.1	6.9	0°52'10"	90°50'9"	90°14'20"	6.11 O
2	9510.16	-0.9977359	-16.4	4.3	4.9	0°52'26"	90°50'26"	90°14'21"	6.11 M
3	163.66	-0.9977166	-14.0	6.4	4.7	0°52'45"	90°50'45"	90°14'23"	6.11 U
4	4123.89	-0.9977126	-23.9	5.1	6.4	0°52'44"	90°50'14"	90°16'2"	6.12 O
5	-5280.79	-0.9977256	-26.1	2.1	6.7	0°52'52"	90°50'22"	90°16'2"	6.12 M
6	-15165.18	-0.9976207	-10.9	21.2	6.0	0°53'11"	90°50'44"	90°15'56"	6.12 U

Tabelle 6.3: Einfluss von Gradienten über der Messzelle; Übersicht ermittelter linearer Parameter am „Sis“ Einzelsensor

linearen Modells ergeben. In der ersten Spalte ist die laufende Nummer vermerkt, Spalte 2 und 3 zeigen Offset/Restfeld des Laborsystems<sup>8</sup> sowie die Empfindlichkeit des Sensors. In den Spalten 4 bis 6 wird eine Statistik über die Restfelder nach der Anpassung aufgestellt. Die Spalten 7 bis 9 zeigen die berechneten Winkel zwischen der Sensorachse und dem Referenzsystem. In der 10ten Spalte wird schließlich ein Verweis auf die entsprechenden Bilder geliefert. In den Bildern wird die Lage und Orientierung des Dipols in Bezug auf den Sensor sowie ein Plot der Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells über den in der  $V$ -Achse erzeugten Feldern gezeigt. Unter der laufenden Nummer 1 wird zunächst eine Referenzmessung durchgeführt<sup>9</sup>, bei der kein zusätzlicher Dipol Verwendung findet. Der zusätzliche Dipol wird dann in einem Abstand von 8 cm vom Zentrum auf der  $U$ -Achse so platziert, dass seine Achse direkt in Richtung des Sensors zeigt (Abbildung 6.11 Mitte). Der Sensor besitzt in dieser Situation ein deutlich höheres Offset/Restfeld (siehe Tabelle 6.3 Nr. 2) sowie eine geringfügige Erhöhung der berechneten Empfindlichkeit. Gleichzeitig kann eine scheinbare Veränderung der Lage des Sensors in Bezug auf das Referenzsystem beobachtet werden. Die stärkste Änderung gegenüber der Referenzmessung ist in der Verteilung der Restfelder nach der Anpassung zu beobachten. Sie sind insgesamt kleiner und auch ihre Verteilung hat sich verändert.

Wird der Stabmagnet wie in Abbildung 6.11 unten dargestellt auf der  $V$ -Achse platziert, „sieht“ der Sensor nur einen geringen Anteil etwa 1.7% des vom Stabmagneten erzeugten Feldes. Dies entspricht, unter Berücksichtigung der magnetischen Schief-

<sup>8</sup>gebildet aus der Superpositionierung des Restfeldes im Laborsystem, dem Offset des Sensors und dem Magnetfeld des Stabmagneten

<sup>9</sup>Die Notwendigkeit hierfür ergibt sich durch eine mangelnde Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Messungen, sobald die Lage des Sensors und/oder die Lage des Ringkerns zwischen den Messungen verändert wird. Als Beispiel hierfür können die Abbildungen 6.11 oben und 6.14 Ringkern unter 60° dienen. Die Rahmenbedingungen für beide Spike-Sphere-Messungen bezüglich der Durchführung gleichen sich. Unterschiede ergeben sich durch die Lage und Positionierung des Ringkerns und dadurch, dass das Instrument zwischen beiden Messungen abgeschaltet wird.

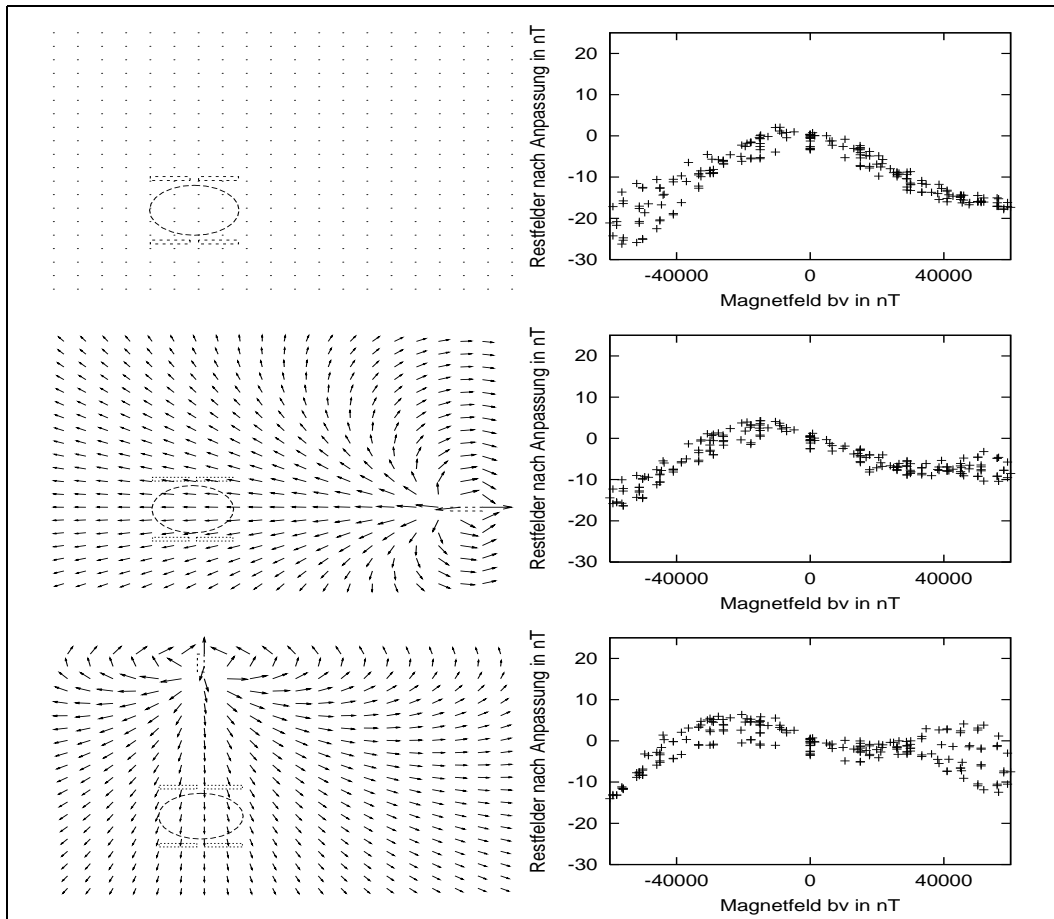


Abbildung 6.11: Einfluss der magnetischen Gradienten auf den Sensor I

stellung des Sensors, ungefähr dem erwarteten Wert. Eine Änderung der Empfindlichkeit des Sensors gegenüber der Referenzmessung ist nicht beobachtbar. Signifikant verändern sich aber wieder die Restfelder.

In der Abbildung 6.12 werden drei weitere Konfigurationen untersucht. Werden alle Ergebnisse berücksichtigt, so lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der Einzelsensor „Sis“ reagiert auf zusätzliche Feldgradienten über seiner Messzelle.
- Bei Genauigkeitsanforderungen von besser als 10 nT ist dieser Einfluss signifikant.
- Treten asymmetrische Feldgradienten über dem Kern auf, wie zum Beispiel in Abbildung 6.12, so wird die Reaktion des Sensors auf diese Gradienten verstärkt.
- Es ist demzufolge notwendig einen Dreiachssensor so zu konstruieren, dass die magnetischen Zentren der drei Einzelsensoren auf einer Linie liegen.

Einer genaueren Untersuchung zur Quantität der beobachteten Trends steht der große Aufwand entgegen, der zu ihrer reproduzierbaren Durchführung notwendig ist. Im

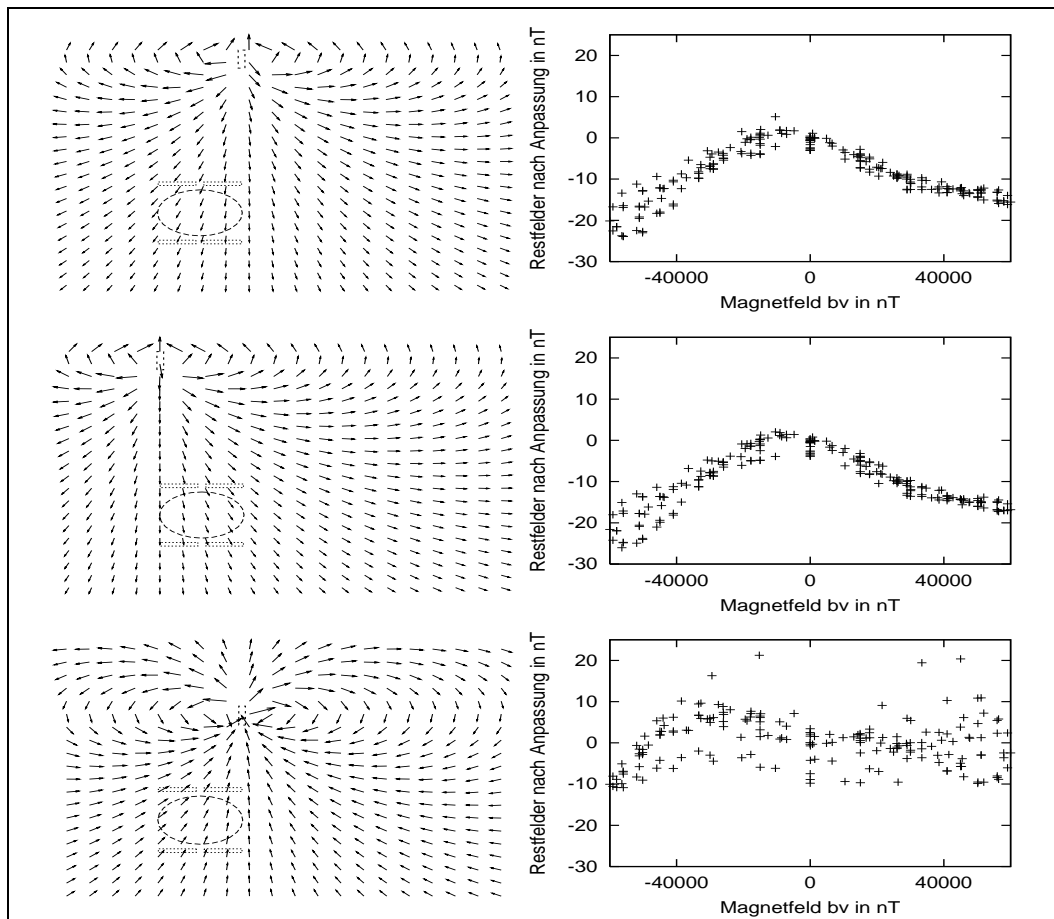


Abbildung 6.12: Einfluss der magnetischen Gradienten auf den Sensor II

Einzelnen müssen hierfür die folgenden Grundlagen geschaffen werden:

- Bei einer Versuchsreihe, die aus ca. 100 Messungen besteht, beläuft sich der Zeitaufwand auf etwa 10 Tage unter der Annahme, dass pro Tag 10 Messungen durchgeführt werden können. In dieser Zeit dürfen sich die Parameter des Laborsystems keinesfalls ändern. Zur Verifikation der Stabilität der Anlage muss zumindest einmal am Tag eine Referenzmessung durchgeführt werden. Dies erhöht natürlich den Aufwand. Im Falle einer Änderung der Parameter des Laborsystems, müssen dann vermutlich alle bisher durchgeführten Messungen wiederholt werden.
- Für die einzelnen Dipolpositionen sollten Schablonen hergestellt werden, die die Exaktheit der Lage des Dipols garantieren.
- Es ist ferner darauf zu achten, dass mehrere verschiedene Dipole und/oder Spulen zum Einsatz kommen.
- Und schließlich sollten auch Voltmeter mit höherer Genauigkeit als bisher zum Einsatz kommen. Die bisher erreichte Genauigkeit bei der Verwendung der „Prema“-Messgeräte in „Magnetsrode“ liegt bei etwa 2.5 bis 3 nT.

## 6.7 Simulation einer Messung im F-Modell

Der bereits in Abbildung 5.3 vorgestellte Sensor „Sis“ wird im folgendem mit dem F-Modell modelliert. Dabei zeigt Abbildung 6.13 schematisch die Komponenten sowie den Aufbau des Modellsensors, wie er sich aus der Entwicklung im Abschnitt 5.2 ergibt.

Bewusst werden nur die für die Funktion des Modells benötigten Teile modelliert.

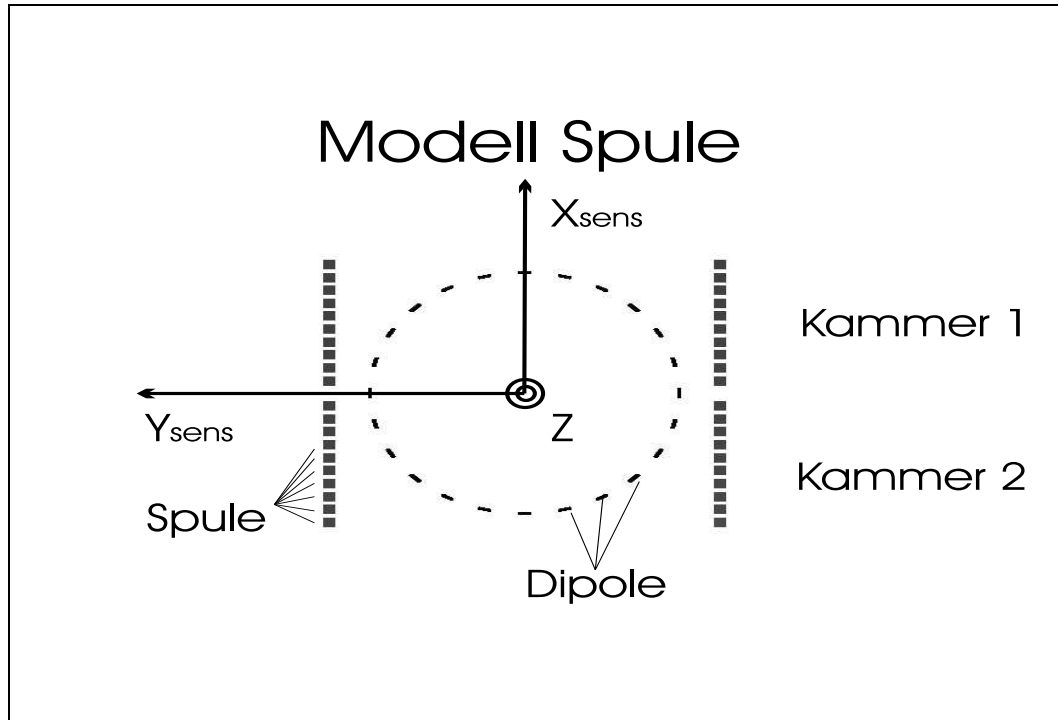


Abbildung 6.13: Aufbau des Modellsensors (schematisch)

So wird zum Beispiel auf die Modellierung mechanisch tragender Teile, wie den Spulenkörper der Kompensationsspule, verzichtet. Der Ringkern und die Erregerspule werden durch Dipole ersetzt. Die Kompensationsspulenwindungen werden in einzelne Leiterstücke zerlegt. Der Einfluss von Zuleitungen wird nicht modelliert. Inhomogenitätsstellen im Ringkern werden durch eine unterschiedliche Stärke einzelner Dipole erzeugt.

Die Kompensationsspule = Pick-Up-Spule des Sensors (ca. 1600 Windungen) wird durch 2 Kammern mit je 10 Windungen angenähert<sup>10</sup>, der Ringkern durch 24 Dipole. Dabei wird darauf geachtet, dass jeweils je zwei Dipole zueinander symmetrisch in Bezug auf die Kompensationsspule stehen. Die Inhomogenitätsstelle des Ringkerns wird dabei unter verschiedenen Winkeln zu seiner Messrichtung angenommen.

<sup>10</sup>Die hier als gering erscheinende Zahl der Windungen entsteht aus einem Kompromiss zwischen Rechengeschwindigkeit und Genauigkeit. Eine höhere Windungszahl vergrößert die Homogenität im Inneren der Kompensationsspule, erhöht aber auch den Aufwand, der zur Berechnung des Flusses und der von ihr im Inneren der Spule erzeugten Magnetfelder deutlich.

Besondere Beachtung findet die Berechnung des magnetischen Flusses in der Pick-Up-Spule. Aufgrund der geringen Abstände zwischen den Dipolen und der Pick-Up-Spule ergeben sich große Gradienten im Fluss über der Geometrie der Spulen. Dies hat signifikante Auswirkungen auf die einsetzbaren Verfahren zur Berechnung der notwendigen Integrale. Um eine einigermaßen gute Genauigkeit zu erreichen, ist eine große Anzahl von Stützstellen notwendig. Verfahren aus [Press et al. 1994] kommen hier zum Einsatz.

Die Funktionalität des Modells wird dabei in mehreren Schritten überprüft. Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 6.5.

### 6.7.1 Idealer Sensor

Zu Beginn wird eine Messung mit einem idealen Sensor simuliert. Dann wird diese Messung mit dem K-Modell ausgewertet. Ergebnisse finden sich in Tabelle 6.5 unter der laufenden Nummer 1. Entsprechend der Nomenklatur in Kapitel 5.2.6 Gl.(5.24) werden die folgenden Parameter verwendet:  $p_{1,1} = 1.0$ , alle anderen Koeffizienten Null. Die Sättigungsfeldstärke wird zu  $H_{\text{Satt}} = 250000 \text{ nT}$  angenommen. Ein zusätzlicher Verstärkungsfaktor von  $7.5 \cdot 10^6$  gleicht fehlende Windungen der Induktionsspule/Kompensationsspule aus und simuliert den Verstärkungsfaktor der Elektronik.

Der Sensor zeigt die erwartete Charakteristik, nämlich keinen Offset und keinerlei Restfelder nach Anpassung der linearen Parameter.

### 6.7.2 Offset und nichtlineare Übertragungsfunktion

Wird zudem ein Offset durch  $p_0 = 36.0$  angesetzt so ergeben sich die in Tabelle 6.5 unter Nr. 2 gezeigten Parameter. Wie erwartet zeigt sich ein Offset. Die berechnete lineare Empfindlichkeit ändert sich nicht. Unter Nr. 3 wird eine vollständig nichtlineare Übertragungsfunktion benutzt. Im Einzelnen werden die in Tabelle 6.4 dargestellten Parameter verwendet.

Die Form der Restfelder nach Anpassung der Spike-Sphere-Messung ähnelt der, die

$p_{ij}$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$j = 1$	58.1	–	–
$j = 2$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$-1.0 \cdot 10^{-7}$	0.0
$j = 3$	0.0	$2.7 \cdot 10^{-10}$	0.0
$j = 4$	$7.0 \cdot 10^{-19}$	$1.1 \cdot 10^{-14}$	0.0
$j = 5$	0.0	0.0	0.0
$j = 6$	0.0	0.0	0.0
$h_{\text{satt}} = 250000$		Faktor = $7.5 \cdot 10^6$	

Tabelle 6.4: Übersicht über nichtlineare Simulationsparameter

am „Sis“-Sensor unter  $45^\circ$  (siehe Abbildung 6.9 und Abbildung 6.14) gemessen wurde. Dabei unterscheidet sich die ermittelte Empfindlichkeit geringfügig von der, die bei alleiniger Verwendung eines Offsets unter 2 ermittelt wird.

Nr	Inhom.	Pos	Parameter		Statistik der Restfelder		
			Offset	Empfindlichkeit	Min	Max	Std. Abw.
1L	—	—	0.00	0.8826922	0.00	0.00	0.00
2O	—	—	31.78	0.8826922	0.00	0.00	0.00
3H	—	—	512.84	0.8827257	-17.46	3.18	4.38
4H	$10^{-4}$	00	513.67	0.8856693	-22.15	3.84	5.28
5H	$10^{-4}$	15	547.55	0.9440885	-23.69	4.12	5.65
6H	$10^{-4}$	30	593.80	1.0238402	-25.84	4.52	6.16
7H	$10^{-4}$	45	651.09	1.1226184	-28.56	5.04	6.80
8H	$10^{-4}$	60	705.48	1.2163972	-31.13	5.52	7.41
9H	$10^{-4}$	75	730.57	1.2596721	-32.21	5.71	7.67
10H	$10^{-4}$	90	731.00	1.2604083	-32.20	5.70	7.67

Tabelle 6.5: Übersicht über verschiedene Simulationen eines Einzelsensors

### 6.7.3 Ringkern mit Inhomogenitätsstelle gedreht

Unter den laufenden Nummern 4–10 werden Messungen an einem Sensor mit einer Inhomogenitätsstelle von  $0^\circ$ – $90^\circ$  simuliert. In der Simulation wird hierbei jeweils ein einziger Dipol unter dem gezeigten Winkel um den Faktor 1.0001 verstärkt. Mit Drehung dieser Inhomogenitätsstelle von  $0^\circ$  auf  $90^\circ$  geht im Modell eine Verstärkung der Empfindlichkeit einher. Im gleichen Mass erhöhen sich auch die Restfelder. Unter den laufenden Nummern 4–10 in Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse der Anpassung eines linearen Modells dargestellt.

## 6.8 Vergleich von Simulation und Messung

In den Abbildungen 6.14 und 6.15 können die Ergebnisse der Messungen und der Simulationen in einer Gegenüberstellung direkt miteinander verglichen werden.

Dazu sind in beiden Abbildungen die Residuen nach Anpassung eines linearen K-Modells über dem in der  $V$ -Achse angelegtem Feld aufgetragen. Den Messungen liegen die bereits in Tabelle 6.2 aufgeführten Messungen (Nr. 1, 4, 5, 6, 7, 18), den Simulationen die in Tabelle 6.5 (Nr. 7–12) aufgeführten Simulationen zu Grunde.

Dabei wurden die Koeffizienten der Simulation aus Gl.(5.24) so angepasst, dass sie den Messungen mit der Inhomogenitätsstelle des Ringkerns unter  $45^\circ$  entsprechen. Ein Vergleich der anderen Messungen mit den Simulationen, wobei die Inhomogenitätsstelle des Ringkerns gedreht wird und alle anderen Parameter gleich bleiben, zeigt, dass die Simulation die Drehung des Ringkerns nicht richtig wiedergeben kann.

Selbst wenn bei der Simulation die Inhomogenität an der Inhomogenitätsstelle verkleinert oder vergrößert wird, zeigt sich dies nur in der Änderung der Empfindlichkeit des Sensors. Im Modell geht dies einher mit der unterschiedlichen Skalierung der Residuen. Die Kurvenform wird hiervon nicht betroffen und bleibt unverändert. Damit auch sie variiert wird<sup>11</sup>, muss in der Simulation von der globalen, für alle Dipole glei-

<sup>11</sup>Wie in den Messungen beobachtet, „reagiert“ der Ringkern auf Felder, die aus der  $-V$  Richtung kommen anders als auf solche, die aus der  $+V$ -Richtung kommen. Eine mögliche, plausible Ur-

chermaßen gültigen Übertragungsfunktion auf eine lokale, für jeden Dipol einzeln zu bestimmende Übertragungsfunktion übergegangen werden.

Mit der Entwicklung in ein Funktionensystem, wie es zum Beispiel Polynome darstellen, wird es möglich, lokale Abschirmeffekte und die Wechselwirkung der Dipole untereinander zu beschreiben. Diese „lokalen“ Parameter sind als „innere“ Parameter des Ringkerns einer Beobachtung nur schwer zugänglich. Zu ihrer Bestimmung sind weitere Messungen notwendig, bei denen der Ringkern unterschiedlichen Feldkonfigurationen ausgesetzt wird, wie sie z.B. durch Verschieben des Ringkerns gegen die Kompensationsspule erreicht wird.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Bestimmung dieser „inneren“ Parameter als sinnvoll zu betrachten ist, zumal die Wahl der Position aller hier angenommenen Modelldipole komplett willkürlich ist. Am Ausgang des Instruments erscheint immer nur eine „Größe“, die integrierend über den kompletten Ringkern gewonnen wird.

Davon unabhängig zeigt sich anhand der Messungen an verschiedenen Einzelsensoren, wie stark die Materialeigenschaften des Kernmaterials und der innere Aufbau des Ringkerns die Parameter eines Sensors dominieren. So lassen sich durchaus Konfigurationen finden, bei denen unter den vorgegebenen Bedingungen keinerlei Querfeldeffekte nachgewiesen werden können (zum Beispiel Sensor „Sisb“, siehe auch Abschnitt 4.4.9) oder solche, bei denen Querfeldeffekte eine weitaus größere Rolle spielen (siehe Sensor „Sisc“ Abschnitt 4.4.10). In Bezug auf einen Einzelsensor lassen sich folgende günstige Faktoren angeben, die einer Querfeldeinflussung entgegen wirken:

- Die Verwendung von Kernmaterial, das möglichst keinen Effekt der „incremental permeability“ zeigt;
- Vollständige Kompensation des Ringkerns, sodass keine unkompenzierten Querfelder entstehen;
- Homogenisierung des Bandmaterials und seiner Wicklung, um Abschirmeffekte zu vermeiden.

Hierbei scheint es der effektivste aber auch aufwendigste Weg zu sein, ein besser geeignetes Material zu finden. Der hier an zweiter Stelle genannte Weg, einen vollkompenzierten Sensor zu entwickeln, wurde bereits gegangen (siehe Abschnitt 4.4.6). Die hier an dritter Stelle genannte Möglichkeit wird nur eine geringfügige Verbesserung des Sensors bewirken.

---

sache hierfür sind Abschirmeffekte innerhalb des Ringkerns.



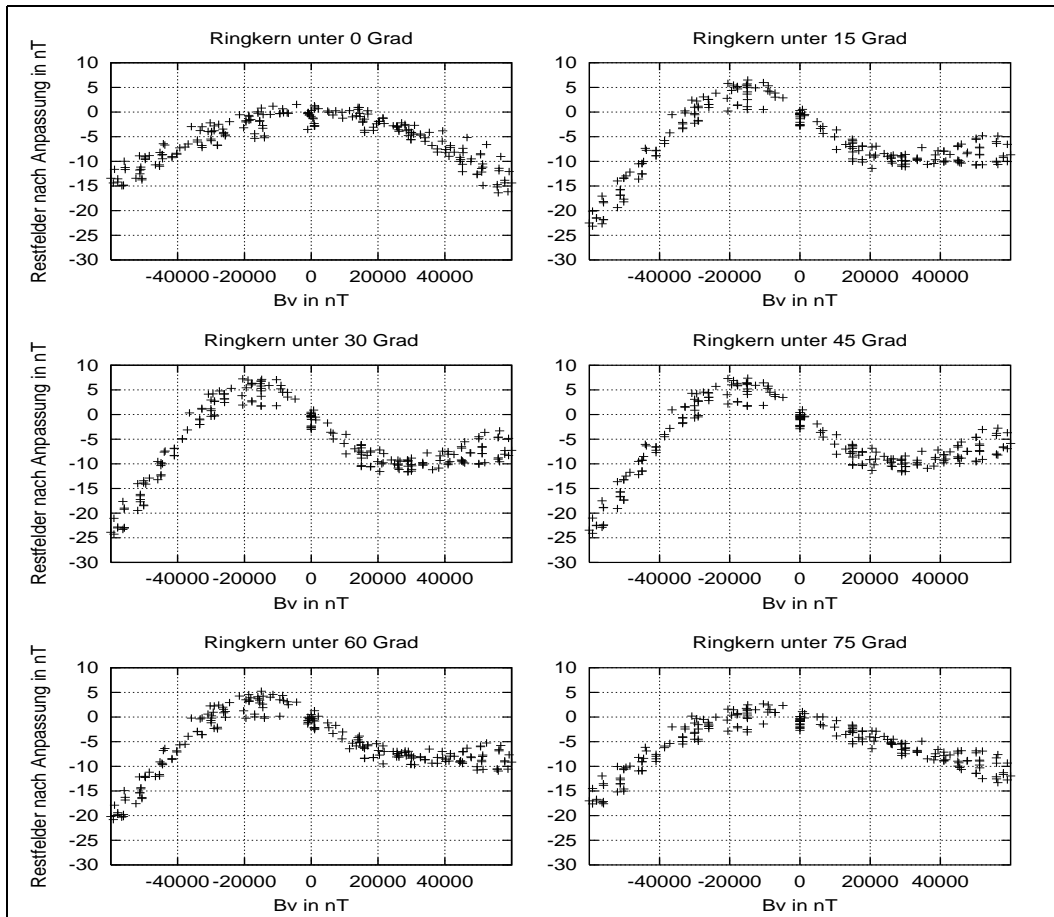


Abbildung 6.14: Messung des Einflusses der Lage des Ringkerns auf die nichtlineare Empfindlichkeit

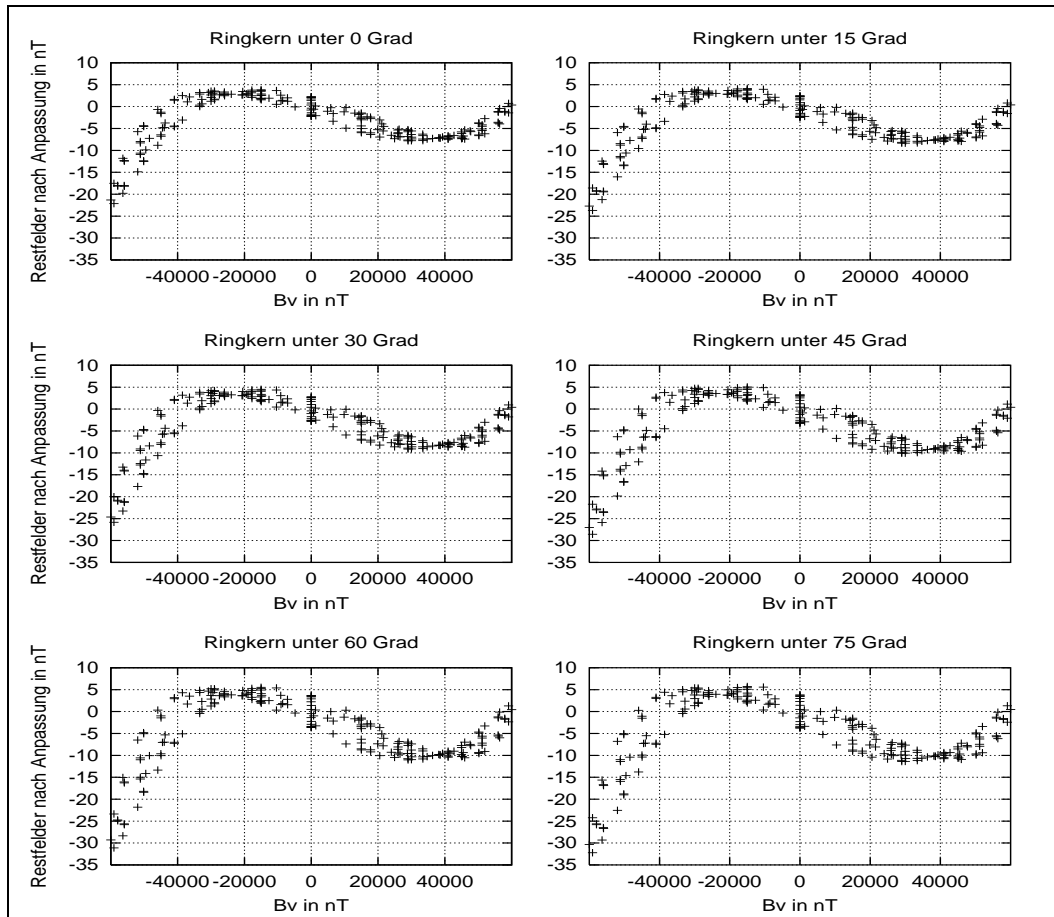


Abbildung 6.15: Simulation des Einfluss der Lage des Ringkerns auf die nichtlineare Empfindlichkeit

## 6.9 Funktionsmodell Dreiachssensor

Abbildung 6.16 zeigt den mechanischen Aufbau eines Dreiaxismagnetometers. An dieser Darstellung ist bereits ersichtlich, dass sich das F-Modell eines Dreiachs-Fluxgate-Magnetometer durch die Überlagerung dreier Einzelsensoren gewinnen lässt. Zur Modellierung im F-Modell sind den Ausführungen aus Kapitel 5.1 jene Komponenten hinzuzufügen, die die Wechselwirkung der drei Einzelsensoren untereinander beschreiben.

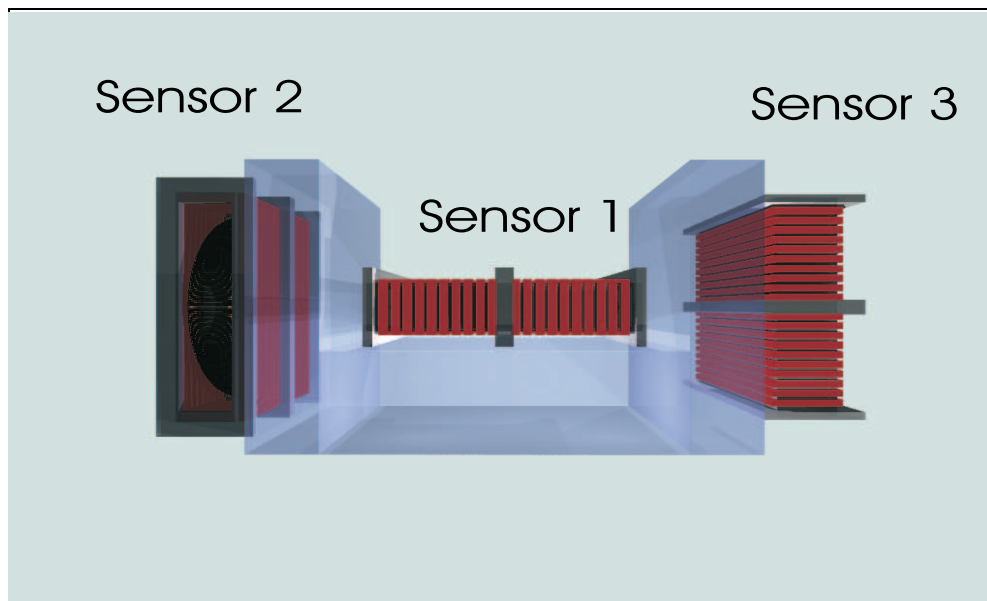


Abbildung 6.16: Ansicht 3-Achs-Magnetometer CLUSTER Typ (schematisch)

Abbildung 6.17 zeigt die für den Y-Sensor zu modellierenden Beiträge der anderen beiden Sensoren. Für den X- und Z-Sensor gilt Entsprechendes. Zusätzlich zu modellierende Beiträge sind,

- der Einfluss der Kompensationsspulen des X- und Z-Sensors auf das durch den Ringkern transformierte Erregersignal und
- der Einfluss der durch die Ringkerne transformierten Erregersignale des X- und Z-Sensors auf den magnetischen Fluss durch die Y-Induktionsspule.

So ist dem Hintergrundfeld am Orte des Y-Sensors das durch die Kompensationsspulen des X- und Z-Sensors erzeugte Magnetfeld zu überlagern. Es entstehen zusätzliche Feldgradienten, die bei der Berechnung der in der Induktionsspule induzierten Spannung berücksichtigt werden müssen. Ebenso muss der magnetische Fluss, der durch den X- und Z-Sensor erzeugt wird, berücksichtigt werden, da allen drei Sensoren des Dreiaxismagnetometers der gleiche Erregerstrom zugeführt wird.

Der Einfluss des X- und Z-Sensors auf den magnetischen Fluss des Y-Sensors ist deutlich kleiner als der Einfluss des Ringkerns des Y-Sensors. Der in Kapitel 5.1

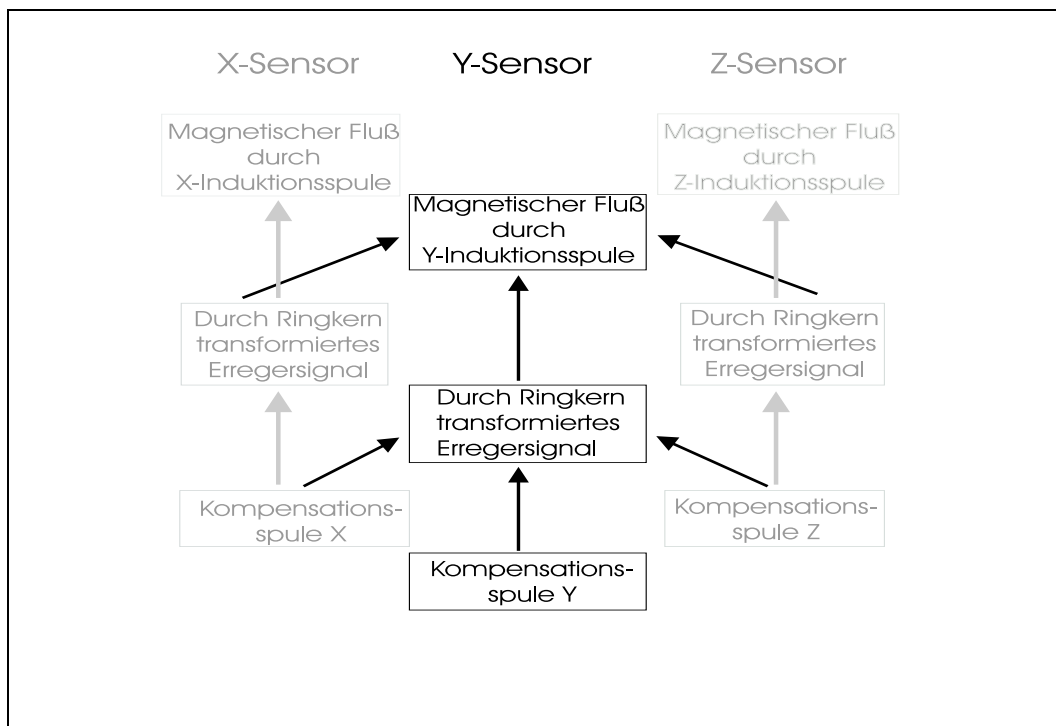


Abbildung 6.17: Wechselwirkung des X- und Z-Sensors mit dem Y-Sensor (schematisch).

entwickelte Regelkreis kann im Falle der Betrachtung von statischen externen Magnetfeldern wie folgt modelliert werden:

Zunächst wird die Antwort des X-Sensors auf ein externes Hintergrundmagnetfeld berechnet. Dabei ergibt sich ein Strom, der durch die Kompensationsspule des X-Sensors fließt. Dieser Strom erzeugt ein zusätzliches Magnetfeld, das auf den Y- und Z-Sensor einwirkt. Die Antwort des Y-Sensors wird unter Berücksichtigung des Hintergrundmagnetfeldes und des Feldes des X-Sensors bestimmt. Der so ermittelte Strom durch den Y-Sensor und den X-Sensor wird bei der Bestimmung der Antwort des Z-Sensors auf das Hintergrundfeld mit berücksichtigt. Es erfolgt eine erneute Bestimmung der Antwort des X-Sensors unter Berücksichtigung der Ströme durch die Kompensationsspulen des Y- und Z-Sensors. Dies Verfahren wird fortgeführt, bis sich die Antworten der Sensoren auf das Hintergrundfeld nicht mehr ändern.

## 6.10 Vergleich von Simulation eines Dreiachssensors im F-Modell mit einer entsprechenden Messung

In den Abbildungen 6.18 und 6.19 ist der Simulation eines Dreiachssensors mittels F-Modell eine Messung an einem realen Sensor gegenübergestellt. Die folgenden Parameter werden für die Simulation benutzt: Der Dreiachssensor wird aus drei identischen Einzelsensoren analog Abschnitt 6.7.2 zusammengestellt. Die magnetischen

Zentren der drei Einzelsensoren befinden sich dabei auf einer Linie. Der Abstand der drei Zentren zueinander beträgt 5 cm, sodass ein Sensor von der Bauform wie in Abbildung 6.16 dargestellt entsteht. Für die Simulation wird das Verfahren wie unter Abschnitt 6.9 dargestellt verwendet, um eine Spike-Sphere-Messung zu simulieren. In Abbildung 6.18 sind die Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells dargestellt. Zusätzlich enthält Abbildung 6.18 in der untersten Reihe die Restfelder des „ungestörten“ Einzelsensors. Diese Abbildung verdeutlicht den Einfluss der Nähe der anderen Einzelsensoren auf einen Einzelsensor im Modell. Für die in Abbildung 6.19 dargestellten Restfelder eines linearen Modells wurde ein CLUSTER-Magnetometer in seinem größten Messbereich vermessen.

In der Abbildung 6.19 werden die Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells über den Eingangsgrößen für die drei Sensoren zeilenweise gezeigt. Zur besseren Orientierung sind die Bilder derart sortiert, dass sich in der ersten Spalte die Messrichtung des Sensors, in der zweiten Spalte die Messrichtung in Richtung der Ringkernebene, aber senkrecht zur Messachse und in der dritten die Richtung senkrecht zur Ringkernebene findet.

In der Simulation ist deutlich zu erkennen, dass der Sensor 1 einen Einfluss auf die Sensoren 2 und 3 ausübt, von ihnen selbst aber nur wenig beeinflusst wird. Ähnliches „scheint“ auch in der Messung beobachtbar zu sein<sup>12</sup>. In beiden Fällen ist jedoch Sensor 2 am stärksten unter den drei Sensoren von dem Einfluss eines anderen Sensors betroffen. Zur weiteren Klärung dieser Frage sind wiederum Messungen an Einzelsensoren notwendig. In jedem Fall ist bei der T-Bauform eines Ringkern-Fluxgate-Magnetometers unter Erdmagnetfeldbedingungen immer mit Querfeldeffekten zu rechnen (siehe auch Abschnitt 4.4).

---

<sup>12</sup>Der Ausdruck „scheint“ bezieht sich darauf, dass ein exakter Nachweis dieser These nur gelingen kann, wenn die drei Sensoren des CLUSTER-Experimentes einzeln untersucht werden. Dies scheitert jedoch daran, dass der Sensor nicht mehr zerstörungsfrei demontiert werden kann.

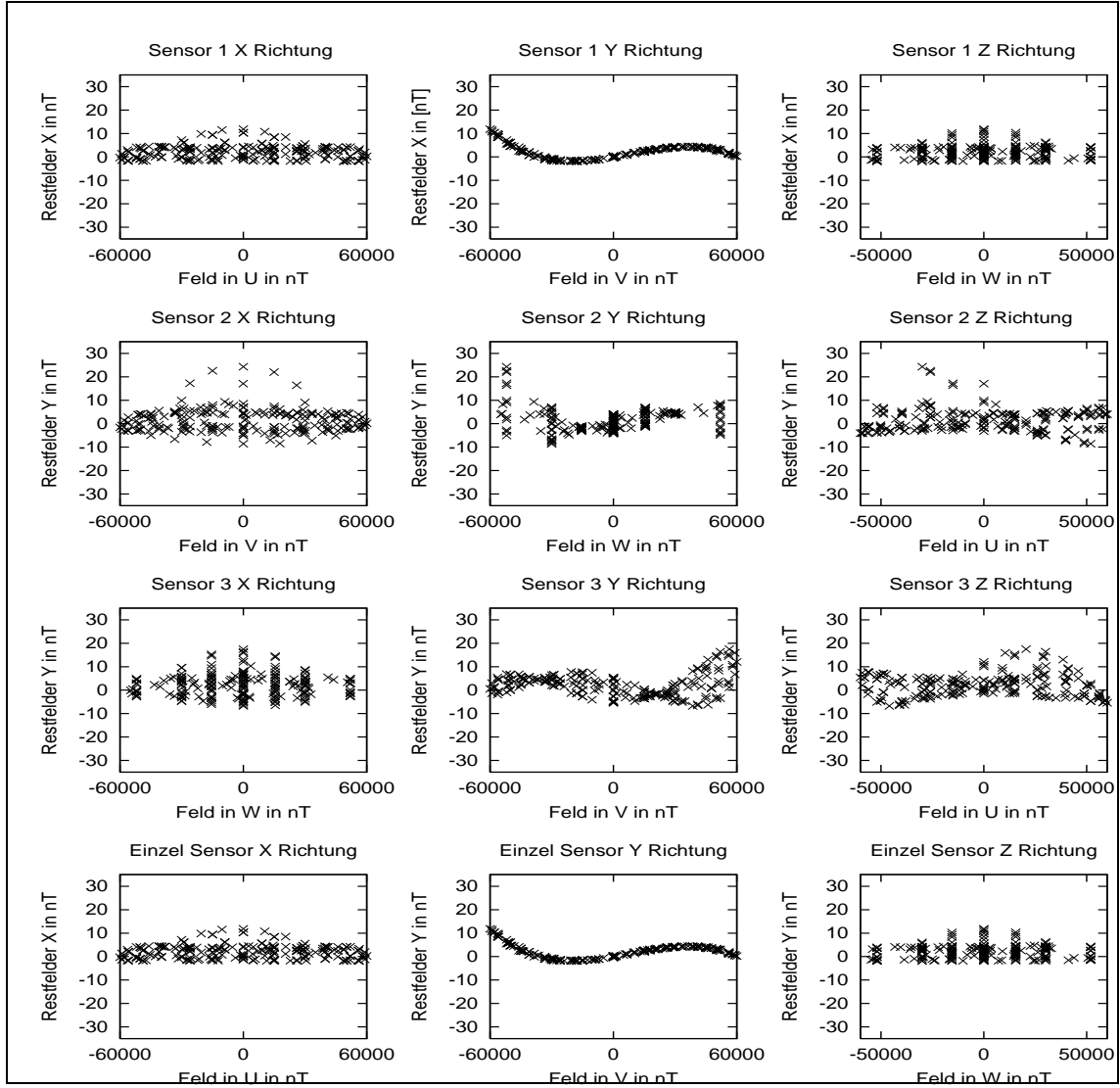


Abbildung 6.18: Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells an eine simulierte Spike-Sphere-Messung eines Dreiachsensors

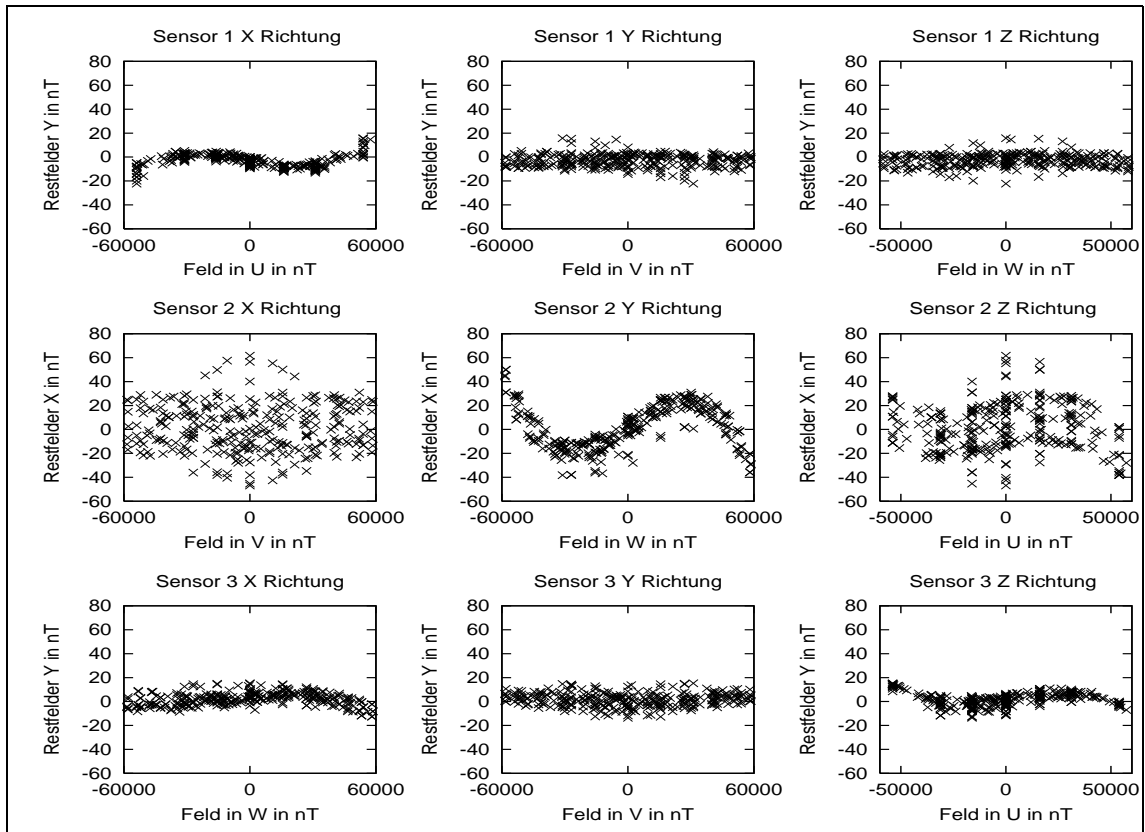


Abbildung 6.19: Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells an eine Spike-Sphere-Messung eines Dreiachsmagnetometers des CLUSTER-Typs in seinem größten Messbereich

## 7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein „Standard“ zur Durchführung und Auswertung von Kalibriermessungen an Magnetometern entwickelt. Dieser Standard erlaubt einen direkten Vergleich von Beobachtungen an zahlreichen, zum Teil in unterschiedlichen Laboren untersuchten Fluxgate-Magnetometern. Eine Voraussetzung seiner Anwendung bildet der Nachweis der Genauigkeit der verwendeten Messkette. Deshalb werden neben einem magnetischen und einem mechanischen Koordinatensystem Verfahren eingeführt, die es erlauben, den Parameter der Homogenität des Laborsystems anzugeben. Dieser Parameter beeinflusst die Qualität der Messungen stark. Er kann direkt aus der Geometrie der zur Kompensation des Erdmagnetfeldes verwendeten Spulensysteme abgeleitet und durch Messungen mit einem absolut messenden Protonenmagnetometer überprüft werden.

So gelingt der Nachweis, im magnetischen Labor des Institutes für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig „Magnetsrode“ magnetische Felder in Richtung und Stärke auf besser als 1 nT erzeugen und messen zu können. Mit Hilfe der in dieser Arbeit eingesetzten automatisierten Verfahren zur Messwertaufnahme können Kalibriermessungen mit gleichbleibender Qualität durchgeführt werden. Letztlich erlaubt das automatisierte Auswerteverfahren eine Vergleichbarkeit der ermittelten Modellparameter. Diesem Zweck dient ebenfalls die Entwicklung des linearen Kalibriermodells (K-Modell) eines Sensors. Es erlaubt die Separation der „inneren“ Parameter eines Dreiachssensors von den „äußeren“ Parametern, die durch den Messaufbau bei der Kalibriermessung bestimmt sind.

Bei allen untersuchten Magnetometern zeigt sich eine Abhängigkeit der Empfindlichkeiten und der Lage der Sensoren mit Änderung der Temperatur. Diese entsteht, obwohl die Kompensationsspulen des Sensors typischerweise als Stromkonstanter ausgelegt sind<sup>1</sup>, und ist bedingt durch die temperaturabhängige Ausdehnung des Trägermaterials der Spulenkörper. Diese Änderung der Empfindlichkeit von zum Beispiel bei den CLUSTER1 Experimenten beobachteten  $\approx 1.4 \cdot 10^{-4}$  pro °C gewinnt mit der Varianz der Temperatur an Bedeutung, denen der Sensor im Einsatz ausgesetzt wird. So bedeutet eine Varianz von 30°C vor einem Hintergrundfeld von  $\approx 50000$  nT die Änderung des vom Sensor detektierten Magnetfeldes um  $\approx 210$  nT. Deshalb sollte richtigerweise zu jedem gemessenen Magnetfeldvektor eines Fluxgate-Magnetometers die Temperatur des Sensors angegeben werden.

Oft reicht das lineare K-Modell nicht aus, das Verhalten des Sensors vollständig zu beschreiben. Deshalb erfolgen weitere Untersuchungen zur Bestimmung der nichtlinearen Anteile der Übertragungsfunktion an unterschiedlichen Fluxgate-Magnetometern.

---

<sup>1</sup>also den Effekt der temperaturabhängigen Widerstandsänderung des Kupfers kompensieren



Grundsätzlich ist der in dieser Arbeit beobachtete nichtlineare Anteil an der Übertragungsfunktion sehr klein (maximal  $80 \text{ nT}/60000 \text{ nT} = 1.3 \cdot 10^{-3}$ , typischerweise aber kleiner als  $40 \text{ nT}/60000 \text{ nT} = 6.7 \cdot 10^{-4}$ ). Obwohl die absolute Genauigkeit in Magnetsrode besser als  $1 \text{ nT}$  ist, kann ein sicherer Nachweis der Nichtlinearitäten der Größenordnung von kleiner  $6.7 \cdot 10^{-4}$  erst vor einem Hintergrundfeld von typischerweise größer als  $10000 \text{ nT}$  geführt werden, da die Genauigkeit für kleinere Felder nicht ausreichend ist, Strukturen, die sich in den Restfehlern nach Anpassung eines linearen Modells manifestieren, zu entdecken.

Der Einfluss des nichtlinearen Querfeldeffekts wird an vier Einzelsensoren untersucht. Die Beobachtungen zeigen

- Der nichtlineare Querfeldeffekt tritt nicht bei allen Sensoren auf.
- Im Falle des Auftretens ist er von der Richtung der gemessenen Felder abhängig,
- und typischerweise in der Größenordnung von  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Basierend auf diesen Beobachtungen wird ein Funktionsmodell (F-Modell) eines Magnetometers entwickelt. Obwohl dieses in der Lage sein soll, die nichtlinearen Querfeldeffekte zu beschreiben, gelingt eine vollständige Beschreibung der beobachteten nichtlinearen Querfeldeffekte nicht. Aber aufgrund der zahlreichen Beobachtungen an Magnetometern verschiedener Hersteller wird ein Modell eines Fluxgate-Magnetometers entwickelt, das den Einfluss von Querfeldeffekten in erster Näherung beschreibt. Dadurch wird es möglich, bei der Weiterentwicklung von Fluxgate-Magnetometern verschiedene Sensorgeometrien zu simulieren.

Der beobachteten Querfeldeinflussung kann über verschiedene Ansätze begegnet werden. Zum einen kann ein vollkompensierter Sensor gebaut werden, der keinerlei unkompenzierte Restmagnetfelder in seinem Inneren zulässt, zum anderen kann das Kernmaterial so gewählt werden, dass es nicht empfindlich auf unkompenzierte Gleichfelder reagiert.

Aus heutiger Sicht scheint die Nutzung von vollkompensierten Sensoren mehr Erfolg zu versprechen. Die Berücksichtigung der folgenden Aspekte führt zu einer Verbesserung von Fluxgate-Magnetometern:

- Das Kernmaterial im Ringkern des Magnetometers muss so befestigt werden, dass es sich mechanisch nicht bewegen kann, da die Bewegung des Kernmaterials zu einer Veränderung der Eigenschaften des Sensors führen. Selbst wenn die Bewegung des Kernmaterials reversibel zur geometrischen Orientierung zur Schwerkraft ist, führen Messungen in unterschiedlichen geometrischen Lagen nicht mehr zu gleichen Instrumentenparametern.
- Wenn möglich sollten Sensoren benutzt werden, deren Ringkerne voll kompensiert sind, sodass die Ringkerne sich in einem durch die Kompensationsspulen erzeugten Nullfeld befinden. In dieser Konfiguration waren die in dieser Arbeit beschriebenen nichtlinearen Querfeldeffekte nicht nachweisbar.
- Falls in dem Sensor keine voll kompensierten Ringkernanordnungen erreichbar sind, sollte das Kernmaterial einen möglichst geringen Effekt der „incremental permeability“ aufweisen.

- Der Abstand zwischen Aufnehmerspule und Ringkern sollte möglichst klein sein, um eine bessere Übertragung des Signals zu erreichen.
- Die Windungen der Kompensationsspule sollten möglichst weit vom Ringkern entfernt sein, um so ein homogenes Feld am Orte des Ringkerns zu bekommen.
- Die zwei vorangegangenen Punkte führen zu einer Trennung von Aufnehmerspule und Kompensationsspule.
- Fluxgate-Magnetometer reagieren sehr kritisch auf Feldgradienten. Deshalb ist eine kompakte Bauform des Sensors anzustreben.
- Hieraus folgt unmittelbar, dass die Einzelkomponenten in den Dreiachssensoren der Doppel-T-Bauform nicht als drei voneinander völlig entkoppelte Systeme betrachtet werden können, da jeder Einzelsensor mehr oder minder starke Feldgradienten bei Messung seiner Magnetfeldkomponente über den Messspulen der anderen Komponenten erzeugt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit von Fluxgate-Magnetometern eine genauere Kenntnis der physikalischen Vorgänge im Umfeld des Ringkerns voraussetzt. Solange keine Beschreibung der lokalen magnetischen Abschirmeffekte im Ringkernmaterial existiert, wird es nicht möglich sein, das Verhalten einzelner „Sensorindividuen“ exakt vorher zu sagen.

# A Das Laborsystem „Magnetsrode“

„Magnetsrode“ ist eine vom Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig betriebene Kalibriereinrichtung. Sie liegt in Braunschweig auf dem Gelände der FAL (Forschungsanstalt für Landwirtschaft) im Wald, also möglichst weit von allen magnetisch störenden technischen Einflüssen entfernt. Da bei Messungen von schwachen Magnetfeldern eine hohe Präzision notwendig ist, und die Messungen sehr störanfällig sind, ist der Aufbau der Kalibrieranlage in vier weitgehend unmagnetischen Messhütten realisiert. Eine Hütte für die Versorgungstechnik, eine für die benötigte Messtechnik, zwei weitere für die Magnetfeldlabore. Dabei sind die Messhütten mit den Magnetfeldlaboren (Haus 2 und Haus 3) ca. 30 m von der Hütte mit der Messtechnik (Haus 1) und ca. 50 m von der Hütte mit der Versorgungstechnik entfernt. Alle Hütten sind auf 0.5 m mächtigem sandigen Lehm und einer darunter liegenden festen trockenen Kies Schicht gebaut. Der Grundwasserspiegel liegt in 9 m Tiefe.

Den Kern des Systems bildet ein dreiachsiges Braunbekspulensystem von etwa 2.2 m maximalem Spulendurchmesser zur dynamischen Kompensation des Erdmagnetfeldes und Erzeugung von Kunstfeldern in allen drei Raumrichtungen. Die geometrischen Abmessungen der Spulen werden im Anhang B beschrieben. Weitere Informationen hierzu finden sich z.B. in [Kertz et al. 1968, Rodemann 1972, Lühr 1984].

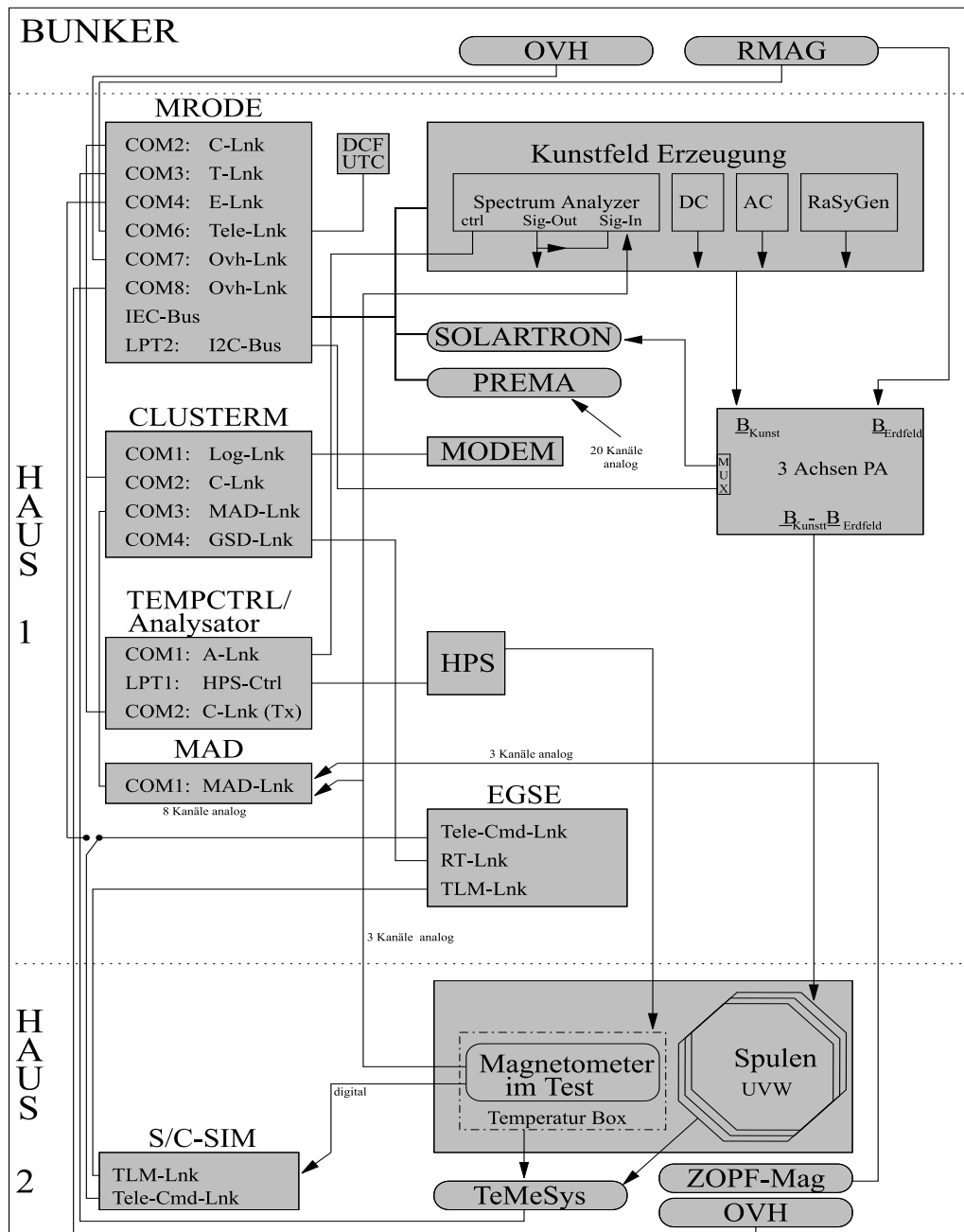


Abbildung A.1: Schematischer Schaltplan „Magnetsrode“

Abbildung A.1 gibt einen Überblick über die elektrische Beschaltung und die Datenverbindungen des Systems und der verwendeten „Hilfssysteme“, die die Präzision und Stabilität der im Braunbekspulensystem erzeugten Kunstfelder gewährleisten ([Rahm/Richter 1994, Rahm/Richter 1995]). Im Einzelnen sind die folgenden Systeme in der Abbildung bezeichnet:

- **Braunbekspulensystem (Spulen)**  
Das Braunbekspulensystem bildet das Zentrum der Anlage. In seinem Inneren werden sowohl die statischen als auch die dynamischen Anteile des Erdmagnetfeldes kompensiert und gleichzeitig können in seinem Inneren künstliche Magnetfelder erzeugt werden. Hier werden die zu untersuchenden Instrumente platziert.
- **3 Leistungsverstärker (3 Achsen PA)**  
Die Leistungsverstärker liefern die benötigten konstanten Ströme zur Erzeugung der Magnetfelder im Braunbekspulensystem für die Kompensation des Erdmagnetfeldes und die Erzeugung der Kunstfelder.  
Die Verstärker beinhalten jeweils einen hochgenauen 1 Ohm Widerstand. Über diesen Widerstand werden die zum Braunbekspulensystem geschickten Ströme geleitet und als Spannungsabfall gemessen.
- **Gleich- und Wechselspannungsquellen zur Kunstfelderzeugung**  
Zur Erzeugung von Kunstfeldern im Braunbekspulensystem stehen sowohl hochgenaue Gleichspannungsquellen als auch Signalgeneratoren zu Verfügung. Ihr Spannungssignal wird über die Aufschaltpunkte innerhalb der Leistungsverstärker auf das Braunbekspulensystem geleitet.
- **Erdmagnetfeldsensor (RMAG)**  
Dieser Sensor ist im Abstand von etwa 50 m weitgehend parallel in seinen Messachsen zum Braunbekspulensystem im Boden in einem Bunker vergraben und dient der Messung des Erdmagnetfeldes, um das Erdmagnetfeld dynamisch kompensieren zu können. Der Einfluss des Braunbekspulensystems auf den Sensor beträgt bei der Kompensation der Erdmagnetfeldes immerhin noch 1-2 nT. Verbunkert wurde der Sensor, um eine möglichst gute mechanische und thermische Stabilität zu erreichen.
- **Temperatur-Messsystem (TeMeSys)**  
Auf den Trägern des Braunbekspulensystems sind mehrere Temperatursensoren (temperaturabhängige Widerstände PT1000) zur Kontrolle der Temperatur innerhalb des Spulensystems und der Temperatur der Spulen selbst montiert. Eine Kontrolle der Temperatur der Spulenkörper erweist sich aufgrund der, mit der temperaturbedingten Ausdehnung der Spulen, verbundenen Änderung des Magnetfeldes innerhalb des Spulensystems als zweckmäßig. Die gemessenen Temperaturdaten werden mittels einer seriellen Schnittstelle ausgelesen.
- **Solartron**  
Die Messung, der durch das Braunbekspulensystem fließenden Ströme ist notwendig, um die genauen Magnetfeldwerte innerhalb des Braunbekspulensystems bestimmen zu können. Hierfür und zur Messung des Erdmagnetfeldes wird das

Solartron-Messsystem verwendet. Dabei handelt es sich bei dem Solartron um ein einkanaliges, integrierendes hochgenaues siebenstelliges Voltmeter. Im hier vorliegenden Aufbau wird es mittels eines Multiplexers (MUX) auf die relevanten Spannungskanäle geschaltet. Gleichzeitig dient es auch zur Messung des durch den Erdmagnetfeldsensor gemessenen Erdmagnetfeldes. Die gemessenen Daten werden mittels des integrierten IEC-Busses an andere Geräte zur Weiterverarbeitung geschickt.

- „Zopf“-Magnetometer

Bei dem „Zopf“-Magnetometer oder auch „Zopf-Mag“ handelt es sich um ein altes Raketenmagnetometer der Firma Förster, dessen Zuleitungskabel zu einem Zopf geflochten sind. Es wird normalerweise zur Überprüfung der Stabilität des Rauschens der Anlage während einer Kalibrierung genutzt und steht fest installiert an einem Ort außerhalb des Zentrums des Braunbekspulensystems.

- MAD-System

Das MAD (**M**agnetic **A**nalog **D**atasystem) ist konzipiert, analoge Spannungen einer Quelle zu digitalisieren und zu speichern. Es handelt sich dabei um einen PC mit einer eingebauten 16 Bit AD-Wandler-Karte, die maximal 8 Kanäle gleichzeitig aufzeichnen kann. Bei der Nutzung eines Kanals beträgt die maximale Aufzeichnungsfrequenz ca. 8 kHz. Digitalisierte Daten können auch mittels einer seriellen Schnittstelle an andere Rechner geschickt werden.

- Prema

Zur Nutzung steht ferner ein 20 kanaliges Digital-Multimeter, das sogenannte Prema, zur Verfügung. Dies Instrument hat keine festgelegte Aufgabe im System und kann von den Experimentatoren für spezielle Messaufgaben verwendet werden. Seine Daten können mittels IEC-Bus gelesen und weiterverarbeitet werden.

- MRODE-PC-Steuerungssystem

Das MRODE-PC-Steuerungssystem besteht aus einem PC, der alle zur Kalibrieranlage gehörenden Systeme steuert und die von diesen Systemen gelieferten Daten empfängt und an das CLUSTER-PC-System weiterleitet. Zur Kommunikation mit den verschiedenen anderen Systemen stehen ihm ein IEC-bus, ein I<sup>2</sup>C-Bus, ein GAME Port sowie acht serielle Schnittstellen zu Verfügung.

- CLUSTER-PC-System

Das CLUSTER-PC-System dient zur Aufzeichnung der Daten. Ferner gehört zu seinen Aufgaben, den Kontakt mit dem Institut über ein Telefon Modem herzustellen. Es kommuniziert mit MRODE, kommandiert das EGSE (**E**arth **G**round **S**upport **E**quipment) und sammelt die Daten vom MAD.

- Protonenmagnetometer (OVH)

Zur Kalibrierung des Braunbekspulensystems steht ein Protonen-Magnetometer zu Verfügung. Außerdem kann die Totalintensität des Erdmagnetfeldes außerhalb der Magnetfeldlabore zur Kontrolle mit gemessen werden.

- **Space-Craft Simulator (S/C-Sim)**  
Der Space-Craft Simulator simuliert die Schnittstelle zwischen dem zu kalibrierenden Magnetometer und dem EGSE und ist nicht der Anlage selbst zuzurechnen. In Abbildung A.1 ist es mitaufgeführt, um das Gefüge, in dem gearbeitet wird zu verdeutlichen.
- **Modem**  
Das Modem dient der Verbindung der Anlage mit der Außenwelt. So ist es möglich, von außerhalb Informationen über den aktuellen Zustand der Anlage zu gewinnen.
- **EGSE**  
Das **E**arth **G**round **S**upport **E**quipment wird als Schnittstelle zwischen Anlage und Magnetfeld-Experiment benutzt. Es empfängt nötige Kommandos des CLUSTER-M-PC-Systems und führt sie aus, steuert damit das zu testende Magnetometer in andere Operationmodes. Das EGSE ist typischerweise die Schnittstelle zwischen dem Laborsystem und dem zu testenden Magnetometer
- **DCF77 Empfänger (DCF UTC)**  
Er dient dem Empfang einer exakten Uhrzeit.
- **Schlumberger-Frequenzanalysator (Spectrum Analyzer)**  
Zur Analyse des Frequenzgangs steht ein Schlumberger-Frequenzanalysator zu Verfügung. Mit ihm lassen sich Amplituden und Phasengang eines Magnetometers automatisch bestimmen.
- **Thermal-Untersuchungsbox (Temperaturbox)**  
Die unmagnetische Thermal-Untersuchungsbox dient zur Untersuchung des zu kalibrierenden Magnetometers bei unterschiedlichen Temperaturen. Sie kann das zu untersuchende Magnetometer thermisch abschirmen. Damit ist es möglich, das Instrument einer Temperatur von ca. 77° Kelvin bis ca. 350° Kelvin auszusetzen, ohne die Temperatur außerhalb der Box innerhalb des Braunkbepulensystems um mehr als ein paar Grad zu verändern.
- **HPS**  
Der HPS regelt die Temperatur innerhalb der Temperaturbox. Dazu misst er die Temperatur in der Box und regelt nach Bedarf die zugeführte Leistung um so dem vorgegebenen Temperatur-Sollwert zu erreichen.

Alle Systeme sind durch Rechner ansteuerbar. Deshalb ist es möglich, die Anlage vollautomatisch Messprogramme steuern und aufzeichnen zu lassen. Weitere Informationen zum Aufbau und der Steuerung von Magnetsrode finden sich z.B. unter [Kertz et al. 1968, Lühr 1984].

## B Geometrische Abmessungen des Spulensystems in „Magnetsrode“

Zur Kompensation des Erdmagnetfeldes und zur Erzeugung von Kunstfeldern ist in „Magnetsrode“ ein dreiachsiges Braunbekspulensystem aufgebaut. Idealerweise besteht ein Braunbekspulensystem in jeder Achsen aus jeweils 4 einzelnen Kreisspulen, um im Inneren des von den Spulen umschlossenen Volumens ein möglichst homogenes Magnetfeld zu erzeugen.

In „Magnetsrode“ werden die Kreisspulen durch achteckige Spulen angenähert, da diese einfacher als Kreisspulen zu fertigen sind. Weitere Erläuterungen hierzu finden sich unter [Rodemann 1972]. Die Eckpunkte dieser Spulen sind mit den Punkten  $P_1$  bis  $P_8$  bezeichnet (siehe Abbildung B.1). Bezogen auf das Zentrum des Spulensystems ergeben sich für die einzelnen Spulen die in Tabelle B.1 angegebenen Koordinaten. Dabei wird der mittlere Abstand der Windungen zu Grunde gelegt. Der Spulenstrom fließt in jeder Spule (von I–IV) von  $P_1$  über  $P_2$  bis  $P_8$  und dann wieder nach  $P_1$ , und erzeugt so über jede Spule einen geschlossenen Stromkreis.



## Einzelspule Braunbek-System

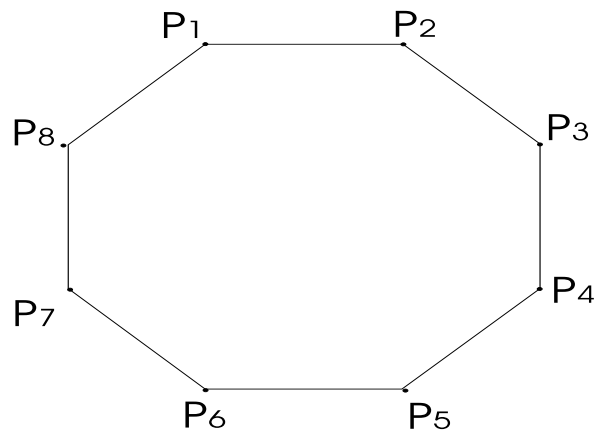


Abbildung B.1: Schematischer Aufbau einer Einzelspule

		„Magnetsrode“ Spulensystem								
		Achse U (Nord–Süd)			Achse V (Ost–West)			Achse W (Unten–Oben)		
		u [cm]	v [cm]	w [cm]	u [cm]	v [cm]	w [cm]	u [cm]	v [cm]	w [cm]
Spule I	P1	80.41	73.75	30.55	-75.56	85.35	31.30	29.85	71.99	81.48
	P2	80.41	73.75	-30.55	-75.56	85.35	-31.30	-29.85	71.99	81.48
	P3	80.41	30.55	-73.75	-31.30	85.35	-75.56	-71.99	29.85	81.48
	P4	80.41	-30.55	-73.75	31.30	85.35	-75.56	-71.99	-29.85	81.48
	P5	80.41	-73.75	-30.55	75.56	85.35	-31.30	-29.85	-71.99	81.48
	P6	80.41	-73.75	30.55	75.56	85.35	31.30	29.85	-71.99	81.48
	P7	80.41	-30.55	73.75	31.30	85.35	75.56	71.99	-29.85	81.48
	P8	80.41	30.55	73.75	-31.30	85.35	75.56	71.99	29.85	81.48
Spule II	P1	26.48	96.69	40.05	-99.04	28.1	41.03	39.07	94.32	26.83
	P2	26.48	96.69	-40.05	-99.04	28.1	-41.03	-39.07	94.32	26.83
	P3	26.48	40.05	-96.69	-41.03	28.1	-99.04	-94.32	39.07	26.83
	P4	26.48	-40.05	-96.69	41.03	28.1	-99.04	-94.32	-39.07	26.83
	P5	26.48	-96.69	-40.05	99.04	28.1	-41.03	-39.07	-94.32	26.83
	P6	26.48	-96.69	40.05	99.04	28.1	41.03	39.07	-94.32	26.83
	P7	26.48	-40.05	96.69	41.03	28.1	99.04	94.32	-39.07	26.83
	P8	26.48	40.05	96.69	-41.03	28.1	99.04	94.32	39.07	26.83
Spule III	P1	-26.48	96.11	40.05	-99.04	-28.1	41.03	39.07	94.32	-26.83
	P2	-26.48	96.11	-40.05	-99.04	-28.1	-41.03	-39.07	94.32	-26.83
	P3	-26.48	40.05	-96.69	-41.03	-28.1	-99.04	-94.32	39.07	-26.83
	P4	-26.48	-40.05	-96.69	41.03	-28.1	-99.04	-94.32	-39.07	-26.83
	P5	-26.48	-96.69	-40.05	99.04	-28.1	-41.03	-39.07	-94.32	-26.83
	P6	-26.48	-96.69	40.05	99.04	-28.1	41.03	39.07	-94.32	-26.83
	P7	-26.48	-40.05	96.69	41.03	-28.1	99.04	94.32	-39.07	-26.83
	P8	-26.48	40.05	96.69	-41.03	-28.1	99.04	94.32	39.07	-26.83
Spule IV	P1	-80.41	73.75	30.55	-75.56	-85.35	31.30	29.85	71.69	-81.48
	P2	-80.41	73.75	-30.55	-75.56	-85.35	-31.30	-29.85	71.69	-81.48
	P3	-80.41	30.55	-73.75	-31.30	-85.35	-75.56	-71.69	29.85	-81.48
	P4	-80.41	-30.55	-73.75	31.30	-85.35	-75.56	-71.69	-29.85	-81.48
	P5	-80.41	-73.75	-30.55	75.56	-85.35	-31.30	-29.85	-71.69	-81.48
	P6	-80.41	-73.75	30.55	75.56	-85.35	31.30	29.85	-71.69	-81.48
	P7	-80.41	-30.55	73.75	31.30	-85.35	75.56	71.69	-29.85	-81.48
	P8	-80.41	30.55	73.75	-31.30	-85.35	75.56	71.69	29.85	-81.48

Tabelle B.1: Geometrische Abmessungen des Braunbekspulensystems in „Magnetsrode“. Die Koordinaten bezeichnen die mittleren Abstände der einzelnen Spulen.

# C Symbolverzeichnis

- $a$  skalare Größe
- $\underline{a}$  vektorielle Größe
- $\underline{\underline{A}}$  Matrix

In der gesamten Arbeit wird mit vier Koordinatensystemen gearbeitet. Die Koordinatensysteme  $UVW$  (Komponenten  $u,v,w$ ) und  $U_L V_L W_L$  (Komponenten  $u_L, v_L, w_L$ ) beziehen sich auf das Laborsystem. Sie sind kartesisch und bezeichnen das magnetische ( $UVW$ ) und das mechanische ( $U_L V_L W_L$ ) Koordinatensystem des Laborsystems. Ähnliche Koordinatensysteme werden auch für das zu untersuchende Instrument eingeführt. Das  $XYZ$  System (Komponenten  $x,y,z$ ) bezeichnet das magnetische Koordinatensystem des Instruments und ist nicht ideal. Das mechanische Koordinatensystem des Instruments  $X_{\text{mech}} Y_{\text{mech}} Z_{\text{mech}}$  System (Komponenten  $x_{\text{mech}}, y_{\text{mech}}, z_{\text{mech}}$ ) dagegen ist kartesisch.

## Kapitel 1 und 2

Bezeichnung	Bedeutung
$\underline{\underline{A}}$	Matrix der linearen Anpassung
$\underline{\underline{A}}_{\text{approx}}$	1. approximierte Matrix der Anpassung
$\underline{\underline{A}}_{\text{Sp}}$	Winkelkorrekturmatrix des Spulensystems
$a_{x,1}$	Koeffizienten einer linearen Matrix der Anpassung
$a_{x,2}$	
$a_{x,3}$	
$a_{y,1}$	
$a_{y,2}$	
$a_{y,3}$	
$a_{z,1}$	
$a_{z,2}$	
$a_{z,3}$	

Bezeichnung	Bedeutung
$B$	Magnetische Induktion
$B_{\text{Aufp}}$	Magnetische Induktion im Aufpunkt
$\underline{B}_{\text{Sp}}(p_{\text{uL}}, p_{\text{vL}}, p_{\text{wL}})$	Magnetische Induktion am Aufpunkt $p$ . Die Angabe des Aufpunkts erfolgt im mechanischen Koordinatensystem des Laborsystems
$B_{\text{u}}$	Magnetische Induktion in Richtung der $U$ -Achse
$B_{\text{v}}$	Magnetische Induktion in Richtung der $V$ -Achse
$B_{\text{w}}$	Magnetische Induktion in Richtung der $W$ -Achse
$\underline{\underline{B}}$	Anpassungsmatrix
$b$	Magnetische Induktion
$\underline{b}_{\text{uL}, \text{vL}, \text{wL}}$	Änderung der magnetischen Induktion im mechanischen Koordinatensystem des Laborsystems
$\underline{b}_{\text{Erd}}$	Magnetische Induktion des Erdmagnetfeldes
$\underline{b}_{\text{Instr}}$	Magnetische Induktion des untersuchten Instruments
$b_{\text{Instr}, \text{x}}$	Gemessene magnetische Induktion in $X$ -Richtung
$b_{\text{Instr}, \text{y}}$	Gemessene magnetische Induktion in $Y$ -Richtung
$b_{\text{Instr}, \text{z}}$	Gemessene magnetische Induktion in $Z$ -Richtung
$\underline{b}_{\text{Labor}}$	Magnetische Induktion erzeugt durch des Laborsystems
$b_{\text{Proton}}$	magnetische Induktion gemessen mit einem Protonenmagnetometer
$\underline{b}_{\text{Rest}}$	magnetische Induktion
$b_{\text{u}}$	Magnetfeld in $U$ -Richtung
$b_{\text{u}, 1}$	Magnetfeld in $U$ -Richtung 1. Messung
$b_{\text{u}, 2}$	Magnetfeld in $U$ -Richtung 2. Messung
$b_{\text{u}, N}$	Magnetfeld in $U$ -Richtung $N$ -te Messung
$b_{\text{v}}$	Magnetfeld in $V$ -Richtung
$b_{\text{v}, 1}$	Magnetfeld in $V$ -Richtung 1. Messung
$b_{\text{v}, 2}$	Magnetfeld in $V$ -Richtung 2. Messung
$b_{\text{v}, N}$	Magnetfeld in $V$ -Richtung $N$ -te Messung
$b_{\text{w}}$	Magnetfeld in $W$ -Richtung
$b_{\text{w}, 1}$	Magnetfeld in $W$ -Richtung 1. Messung
$b_{\text{w}, 2}$	Magnetfeld in $W$ -Richtung 2. Messung
$b_{\text{w}, N}$	Magnetfeld in $W$ -Richtung $N$ -te Messung
$b_{\text{x}, 1}$	Magnetfeld in $X$ -Richtung 1. Messung
$b_{\text{x}, 2}$	Magnetfeld in $X$ -Richtung 2. Messung
$b_{\text{x}, N}$	Magnetfeld in $X$ -Richtung $N$ -te Messung
$\underline{\underline{E}}_{\text{SpP}}(p_{\text{uL}}, p_{\text{vL}}, p_{\text{wL}})$	Ortsabhängiger Übertragungsfaktor des Spulensystems
$\underline{\underline{E}}_{\text{Sp0}}$	Übertragungsfaktor
$\underline{\underline{E}}_{\text{SpT}}$	temperaturabhängige Empfindlichkeitsänderung des Spulensystems

Bezeichnung	Bedeutung
$e$	Erwartungswert
$e_{\text{kurz}}$	Erwartungswert Kurzzeitbuffer
$e_{\text{lang}}$	Erwartungswert Langzeitbuffer
$e_{\text{Sp0u}}, e_{\text{Sp0v}}, e_{\text{Sp0w}}$	Koeffizienten der Matrix $\underline{\underline{E}}_{\text{Sp0}}$
$e_{\text{SpTu}}, e_{\text{SpTv}}, e_{\text{SpTw}}$	Koeffizienten der Matrix $\underline{\underline{E}}_{\text{SpT}}$
$e_{\text{SpT0u}}, e_{\text{SpT0v}}, e_{\text{SpT0w}}$	Koeffizienten der linearen Temperaturanpassung
$e_{\text{SpT1u}}, e_{\text{SpT1v}}, e_{\text{SpT1w}}$	
$\underline{e}_u$	Einheitsvektoren im $UVW$ -System
$\underline{e}_v$	
$\underline{e}_w$	Einheitsvektoren des mech. Instrumentenkoordinatens.
$\underline{e}_{x_{\text{mech}}}$	
$\underline{e}_{y_{\text{mech}}}$	
$\underline{e}_{z_{\text{mech}}}$	
$f$	Vorhersagefehler
$f_{\text{kurz}}$	Vorhersagefehler Kurzzeitbuffer
$f_{\text{lang}}$	Vorhersagefehler Langzeitbuffer
$H$	Magnetfeld
$h_1, h_2$	Homogenitätsparameter
$I$	Strom
$I_u$	Strom durch das Spulensystem in $U$ -Richtung
$I_v$	Strom durch das Spulensystem in $V$ -Richtung
$I_w$	Strom durch das Spulensystem in $W$ -Richtung
$i_k$	Strom des $k$ -ten Leiterelementes
$l$	Länge des Leiters
$d\mathbf{l}$	infinitesimaler Abschnitt des Leiters
$\underline{m}$	Messwertvektor
$\text{Max}_u$	Maximal angelegtes Magnetfeld in $U$ -Richtung
$\text{Max}_v$	Maximal angelegtes Magnetfeld in $V$ -Richtung
$\text{Max}_w$	Maximal angelegtes Magnetfeld in $W$ -Richtung
$\text{Min}_u$	Minimal angelegtes Magnetfeld in $U$ -Richtung
$\text{Min}_v$	Minimal angelegtes Magnetfeld in $V$ -Richtung
$\text{Min}_w$	Minimal angelegtes Magnetfeld in $W$ -Richtung
$\mu_0$	magnetische Konstante
$\mu_{\text{rel}}$	
$m_{\text{neu}}$	neuer Messwert
$N$	Anzahl der Messungen
$\underline{p}$	Ortsvektor
$p$	Ortsvektor
$\underline{p}_{\text{Auf}}$	Ortsvektor zum Aufpunkt
$\underline{p}_{\text{Ref}}$	Ortsvektor zum Referenzpunkt
$Q$	Quotient
$Q(\underline{x})$	Abstandsquadrat

Bezeichnung	Bedeutung
$r$	Ortsvektor
$T$	Temperatur
$U$	Eingangsspannung
$U_a$	Abstand des Leiters von der $U$ -Achse
$U, V, W$	Koordinatenachsen des magnetischen Koordinatensystems des Laborsystems
$\underline{U}_{\text{Kunst}}$	Spannung, aus der das künstliche Magnetfeld abgeleitet wird
$U_L, V_L, W_L$	Koordinatenachsen des mechanischen Koordinatensystems des Laborsystems
$\underline{U}_{\text{RMag}}$	Vom Magnetometer gelieferte Spannung
$\underline{e}_{u_L}, \underline{e}_{v_L}, \underline{e}_{w_L}$	Einheitsvektoren des mechanischen Koordinatensystems des Laborsystems
$u_L, v_L, w_L$	Position im mechanischen Koordinatensystem des Laborsystems
$u, v, w$	Komponenten des magnetischen Koordinatensystems des Laborsystems
$X, Y, Z$	Koordinatenachsen des magnetischen Koordinatensystems des Instruments
$X_{\text{mech}}, Y_{\text{mech}}, Z_{\text{mech}}$	Koordinatenachsen des mechanischen Koordinatensystems des Instruments
$\underline{x}$	Anpassungsvektor
$u, v, w$	Komponenten des magnetischen Koordinatensystems des Instruments
$W_a$	Abstand des Leiters von der $W$ -Achse

### Kapitel 3

Bezeichnung	Bedeutung
$\angle[S, U]$	Winkel zwischen Sensor $S$ und $U$ -Achse
$\angle[S_x, U]$	Winkel zwischen Sensor $S_x$ und $U$ -Achse
$\angle[S_x, V]$	Winkel zwischen Sensor $S_x$ und $V$ -Achse
$\angle[S_x, W]$	Winkel zwischen Sensor $S_x$ und $W$ -Achse
$\angle[S_y, U]$	Winkel zwischen Sensor $S_y$ und $U$ -Achse
$\angle[S_y, V]$	Winkel zwischen Sensor $S_y$ und $V$ -Achse
$\angle[S_y, W]$	Winkel zwischen Sensor $S_y$ und $W$ -Achse
$\angle[S_z, U]$	Winkel zwischen Sensor $S_z$ und $U$ -Achse
$\angle[S_z, V]$	Winkel zwischen Sensor $S_z$ und $V$ -Achse
$\angle[S_z, W]$	Winkel zwischen Sensor $S_z$ und $W$ -Achse
$\angle[S, V]$	Winkel zwischen Sensor $S$ und $V$ -Achse
$\angle[S, W]$	Winkel zwischen Sensor $S$ und $W$ -Achse

Bezeichnung	Bedeutung
$A$	Amplitude
$b_1$	Messwert
$b_2$	
$b_{\text{Instr},x}$	gemessene magnetische Induktion des Instruments in $X$ -Richtung
$b_{\text{Instr},y}$	gemessene magnetische Induktion des Instruments in $Y$ -Richtung
$b_{\text{Instr},z}$	gemessene magnetische Induktion des Instruments in $Z$ -Richtung
$\underline{b}_{\text{korrigiert}}$	magnetische Induktion nach Korrektur
$b_{\text{Offset}}$	Offset des Instruments
$b_{\text{Rest}}$	Restfeld der magnetischen Induktion
$b_u$	magnetische Induktion aus Richtung der $U$ -Achse
$b_v$	magnetische Induktion aus Richtung der $V$ -Achse
$b_w$	magnetische Induktion aus Richtung der $W$ -Achse
$\underline{b}_{\text{Hintergrund}}$	Hintergrundfeld
$\underline{b}_{\text{Instr}}$	gemessene magnetische Induktion des Instruments
$\underline{b}_{\text{Ist}}$	Istfeld
$\underline{b}_{\text{Labor}}$	im Labor erzeugte magnetische Induktion
$\underline{b}_{\text{Off}}$	Offset
$\underline{b}_{\text{Ref}}$	magnetische Induktion im Laborsystem
$\underline{b}_{\text{Rest}}$	Restfeld
$\underline{b}_{\text{Soll}}$	Sollfeld
$\underline{b}_{\text{Sto}}$	magnetische Beeinflussung
$\underline{\underline{D}}$	Abbildungsmatrix
$\underline{\underline{D}}_{\text{Euler}}$	Drehmatrix (Eulerdrehung)
$E_x$	Empfindlichkeit des Sensors in $X$ -Richtung
$E_y$	Empfindlichkeit des Sensors in $Y$ -Richtung
$E_z$	Empfindlichkeit des Sensors in $Z$ -Richtung
$\underline{\underline{E}}$	Empfindlichkeitskorrekturmatrix
$e_1$	Empfindlichkeit
$\underline{e}_1$	Einheitsvektor
$\underline{e}_2$	
$\underline{e}_3$	
$f$	Frequenz
$F_{\text{Instr}}$	Fehler des Instruments
$F_{\text{Sp}}$	Fehler des Spulensystems
$\Phi$	Phase
$\phi$	Phasenwinkel
$\gamma$	Winkel
$\underline{\underline{I}}$	Einheitsmatrix
$\eta$	Winkel
$l_1$	Koeffizienten der linearen Abbildung
$l_2$	
$l_3$	
$\lambda$	Winkel der Eulerdrehung
$\underline{\underline{M}}_1$	Matrix des Anpassung
$\underline{\underline{M}}_2$	

Bezeichnung	Bedeutung
$m_{11}, m_{12}, m_{13}$ $m_{21}, m_{22}, m_{23}$ $m_{31}, m_{32}, m_{33}$	Matrizelemente
$\mu$	Winkel der Eulerdrehung
$\underline{\underline{\mathbf{O}}}$	Orthogonalisierungsmatrix
$\omega$	Kreisfrequenz
$S$	Magnetometer Einzelsensor
$t$	Zeit
$T$	Temperatur
$\tau$	Laufzeit
$U, V, W$	Koordinatenachsen des magnetischen Koordinatensystems des Labors
$\beta$	Winkel
$\xi_{xy}$	Winkel zwischen $X$ - und $Y$ -Achse des Sensors
$\xi_{xz}$	Winkel zwischen $X$ - und $Z$ -Achse des Sensors
$\xi_{yz}$	Winkel zwischen $Y$ - und $Z$ -Achse des Sensors
$X, Y, Z$	Koordinatenachsen des magnetischen Koordinatensystems des Instruments
$X_0, X_1, X_2$	Koeffizienten
$Y_{\text{mess}}$	Messwert
$v$	Winkel der Eulerdrehung

## Kapitel 4

Bezeichnung	Bedeutung
$\ \cdot\ _2$	Quadrat der Euklidischen Vektornorm
$\angle[S, U]$	Winkel zwischen Sensor $S$ und $U$ -Achse
$\angle[S, V]$	Winkel zwischen Sensor $S$ und $V$ -Achse
$\angle[S, W]$	Winkel zwischen Sensor $S$ und $W$ -Achse
$a_{ijk}$	Koeffizienten der Anpassung
$a_{1j}, a_{2k}, a_{3l}$	Koeffizienten der nichtlinearen Richtungsabhängigkeit
$b_u$	magnetische Induktion aus $U$ -Richtung
$b_v$	magnetische Induktion aus $V$ -Richtung
$b_w$	magnetische Induktion aus $W$ -Richtung
$b_x$	Messwert magnetische Induktion in $X$ -Richtung
$D$	Datenmenge
$\underline{\underline{\mathbf{D}}}_{\text{Euler}}$	Drehmatrix (Eulerdrehung)
$d_{11}, d_{12}, d_{13}$	Koeffizienten der linearen Anpassung
$\underline{\underline{\mathbf{d}}}$	Iterationsrichtung
$\underline{\underline{\mathbf{E}}}$	Einheitsmatrix
$\underline{\underline{\mathbf{E}}}$	Empfindlichkeitskorrekturmatrix



Bezeichnung	Bedeutung
$e_1$	Empfindlichkeit
$e_i$	$i$ -te Koeffizient
$f_i(\underline{x})$	Funktionswert des Vektors $\underline{x}$
$\underline{E}()$	Fehlerfunktion
$g$	„neue“ Koeffizienten
$h$	Schrittweite
$i,j,k$	Laufindices
$\underline{J}()$	Jacobimatrix
$\underline{L}()$	Lineare Funktion
$\lambda$	Iterationsparameter
$m$	Zahl der Gleichungen
$M, N, P$	Maximaler Schleifenindex
$\underline{\underline{M}}_2$	Matrix des Anpassung
$n$	Zahl der Unbekannten
$\underline{\underline{O}}$	Orthogonalisierungsmatrix
$x$	Variable
$\underline{x}$	Vektorvariable
$\underline{x}^*$	Vektor der Datenmenge

## Kapitel 5

Bezeichnung	Bedeutung
$A$	Fläche
$A_0$	Erregeramplitude
$a_k$	Koeffizient: Effekte der Hysterese
$B$	magnetische Induktion
$\underline{B}$	magnetischer Induktionsvektor
$B_{Err}$	angeregte magnetische Induktion
$b$	magnetische Induktion, normiert auf $H_{Satt}$
$b_k$	Koeffizient: Effekte der Hysterese
$\chi$	Suszeptibilität
$d\underline{A}$	Vektor in Richtung der Normalen von $A$
$\underline{\underline{E}}^0$	Einheitsvektor in Richtung des Leiters
$\underline{e}_{Dip,x}, \underline{e}_{Dip,y}, \underline{e}_{Dip,z}$	Einheitsvektor lokales Dipolkoordinatensystem
$f_{geo}$	Geometriefaktor
$\Phi$	magnetische Fluss

Bezeichnung	Bedeutung
$H$	Magnetfeld
$\underline{H}$	Magnetfeldvektor
$h$	Magnetfeld, normiert auf $H_{\text{Satt}}$
$H_{\text{Dip},x}, H_{\text{Dip},y}, H_{\text{Dip},z}$	Magnetfeld durch Dipol erzeugt
$H_{\text{Err}}$	angeregtes Magnetfeld
$\underline{H}_{\text{Leiter}}$	von einem Leiterstück erzeugtes Magnetfeld
$\underline{H}_{\text{Komp}}$	Magnetfeld der Kompensationsspulen
$\underline{H}_{\text{Ext}}$	externes Magnetfeld
$\underline{H}_{\text{Res},t}$	resultierendes Magnetfeld
$I$	Strom
$\underline{J}$	Magnetisierung
$k$	Laufindex
$\underline{k}_{\text{Ort}}$	Ortsabhängige Proportionalitätskonstante
$\underline{m}$	Dipolmoment
$\mu_0$	magnetische Konstante
$\mu_{\text{rel}}$	materialabhängige Permeabilitätszahl
$I_{\text{Err}}$	Erregerstrom
$\nu$	Erregerfrequenz
$\omega$	Kreisfrequenz
$\underline{p}$	Aufpunkt
$\underline{p}_{\text{Dip}}$	Position eines Dipols
$r$	Abstand
$\underline{r}$	Abstandsvektor
$t$	Zeit
$U_{\text{Ind}}$	Induktionsspannung

## Kapitel 6 und 7

Kapitel 6 behandelt im Wesentlichen die durchgeführten Messungen. Werden Symbole verwendet, so erfolgt ein direkter Verweis auf frühere Kapitel, in denen die Symbole bereits verwendet worden.

# Tabellenverzeichnis

2.1	Berechnete Übertragungsfaktoren im Zentrum des Spulensystems für Nominalpositionen der Spulen . . . . .	20
2.2	Berechnete Übertragungsfaktoren im Zentrum des Spulensystems unter Variation der Nominalpositionen der Spulen . . . . .	23
2.3	Aus Messungen ermittelte Parameter von „Magnetsrode“ . . . . .	29
3.1	Verwendete Parameter . . . . .	69
3.2	Resultat der Anpassung . . . . .	73
3.3	Resultat der Offsetmessung . . . . .	74
3.4	Resultat der Temperatúrauswertung . . . . .	76
4.1	Übersicht über alle untersuchten Magnetometer . . . . .	95
6.1	Übersicht über die ermittelten am besten angepassten Koeffizienten beim Minimal-Modell . . . . .	117
6.2	Übersicht ermittelter Parameter am „Sis“ Einzelsensor I . . . . .	126
6.3	Einfluss von Gradienten über der Messzelle; Übersicht ermittelter linearer Parameter am „Sis“ Einzelsensor . . . . .	130
6.4	Übersicht über nichtlineare Simulationsparameter . . . . .	134
6.5	Übersicht über verschiedene Simulationen eines Einzelsensors . . . . .	135
B.1	Geometrische Abmessungen des Braunbekspulensystems in „Magnetsrode“. Die Koordinaten bezeichnen die mittleren Abstände der einzelnen Spulen. . . . .	154

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Ansicht eines Laborsystems. In diesem System ist bereits der Sensor des zu untersuchenden Instruments platziert. Das kleine Bild oben links zeigt eine Ausschnittvergrößerung mit dem Sensor im Mittelpunkt. Das kleine Bild oben rechts zeigt eine vollständige Ansicht des Laborsystems. . . . .	5
2.2	Ablauf einer Kalibriermessung (schematisch) . . . . .	6
2.3	„Achsenmessung“: Auf der linken Seite sind die Eingangsfelder des Laborsystems über den Kalibrierschritten aufgetragen, auf der rechten Seite die Antwort des untersuchten Instruments. . . . .	10
2.4	Anpassung verschiedener Modelle . . . . .	11
2.5	Variation des Erdmagnetfeldes an einem „magnetisch ruhigen“ Tag . .	13
2.6	Aufbau von „Magnetsrode“ schematisch . . . . .	15
2.7	Schematischer Schaltungsaufbau des Verstärkers . . . . .	16
2.8	Verschiedene Spulenkonfigurationen . . . . .	18
2.9	Aufbau des Braunbekspulensystems in „Magnetsrode“ (schematisch) . .	19
2.10	Illustration zur „Worst Case“ Abschätzung im Spulensystem . . . . .	21
2.11	Homogenität der Magnetfelder im Inneren des als ideal angenommenen Braunbekspulensystem in „Magnetsrode“ . . . . .	24
2.12	Der Einfluss von Fertigungstoleranzen auf die Homogenität der Magnetfelder im Inneren des Braunbekspulensystem in „Magnetsrode“ . .	25
2.13	Maximal erwartete Änderung des Übertragungsfaktors bei der Änderung der Fertigungstoleranzen in „Magnetsrode“ . . . . .	26
2.14	Schematischer Aufbau des Datenflusses zur automatischen Erfassung von Datenvektoren . . . . .	32
2.15	Gewinnung von Kalibriervektoren (schematisch) . . . . .	34
2.16	Oben: Messdaten einer Komponente; Mitte: Quotient der Vorhersagefehler; unten: Ausgewählte Bereiche . . . . .	37
2.17	Flussdiagramm möglicher Operationen zur Normierung der Vektoren eines Rohdatenblocks . . . . .	39
3.1	Abbildung einer magnetischen Induktion mittels K-Modell (schematisch)	43
3.2	Geometrische Deutung der Orthogonalisierungsmatrix zur Transformation des Instrumentensystems in das Referenzsystem . . . . .	47
3.3	Geometrische Deutung der Orthogonalisierung des Instrumentensystems und seiner Überführung ins Referenzsystem . . . . .	48
3.4	Versuchsaufbau zur Bestimmung des analogen Amplituden/Phasengangs	58

3.5	Datensichtung: Fehlende Telemetrieblöcke in den Daten . . . . .	64
3.6	„Ali“-Messung: Rohdaten des Instruments . . . . .	66
3.7	„Ali“-Messung: Detektierte Sprünge . . . . .	67
3.8	„Ali“-Messung: Ausgewählte Bereiche . . . . .	68
3.9	Spike-Sphere-Messung: Rohdaten des Instruments . . . . .	70
3.10	Spike-Sphere-Messung: Kalibriervektoren des Instruments . . . . .	71
3.11	Spike-Sphere-Messung: Restfelder nach Anpassung . . . . .	72
3.12	Nullfeld des Instruments über der Zeit bei Variation der Temperatur . .	77
3.13	Ermittelte Empfindlichkeiten der Sensorkomponenten über der Tempe- ratur . . . . .	78
3.14	Ermittelte Schiefstellung der Sensorkomponenten über der Temperatur	79
3.15	Ermittelte Euler Drehung des Sensors über der Zeit . . . . .	80
4.1	Anpassung eines linearen K-Modells. Links: Im Laborsystem angeleg- te Magnetfelder. Rechts: Restfelder nach Anpassung eines linearen K- Modells . . . . .	88
4.2	Übersicht aller verwendeten Sensoren: A) Typ Förster; B) Typ CLU- STER, TETHER; C) Typ DS1 D) Einzelsensor. Alle Sensoren sind entsprechend ihrer Größen dargestellt. . . . .	90
5.1	Blockschaltbild eines Analog- und eines Digital-Magnetometers . . . . .	97
5.2	Funktionsweise eines Fluxgate-Magnetometers nach dem Oberwellen- prinzip (schematisch) . . . . .	98
5.3	Skizze eines Einzelsensors . . . . .	99
5.4	Aufbereitung des F-Modells für die Simulation . . . . .	100
5.5	Zur Modellierung des Kerns . . . . .	102
5.6	Funktionsschema der vereinfachten Simulation . . . . .	107
6.1	Vergleich einer Messung und einer Simulation (schematisch) . . . . .	109
6.2	Lage des Einzelsensors bei den Messungen . . . . .	111
6.3	Linearitätsmessung am Einzelsensor. Komponenten der Kalibriervek- toren aufgetragen über der Zeit. . . . .	113
6.4	Linearitätsmessung; Restfelder nach Anpassung verschiedener Modelle über der Zeit . . . . .	114
6.5	Linearitätsmessung; Restfelder nach Anpassung verschiedener Modelle über $v_{\text{Ref}}$ . . . . .	115
6.6	Spike-Sphere-Messung am Einzelsensor. Komponenten der Kalibrier- vektoren aufgetragen über der Zeit. . . . .	120
6.7	Spike-Sphere-Messung; Restfehler nach Anpassung verschiedener Mo- delle über $v_{\text{Ref}}$ . . . . .	121
6.8	Oben: Ideale Richtungsabhängigkeit eines Einzelsensors; Mitte: Rich- tungsabhängigkeit eines realen Einzelsensors; Unten: Differenz . . . . .	124
6.9	Einfluss der Lage des Ringkerns auf die nichtlineare Empfindlichkeit . .	125
6.10	Spike-Sphere-Messung; Restfelder nach Anpassung verschiedener Sen- soren über dem Magnetfeld in Richtung $v_{\text{Ref}}$ . . . . .	128
6.11	Einfluss der magnetischen Gradienten auf den Sensor I . . . . .	131

6.12	Einfluss der magnetischen Gradienten auf den Sensor II . . . . .	132
6.13	Aufbau des Modellsensors (schematisch) . . . . .	133
6.14	Messung des Einflusses der Lage des Ringkerns auf die nichtlineare Empfindlichkeit . . . . .	137
6.15	Simulation des Einfluss der Lage des Ringkerns auf die nichtlineare Empfindlichkeit . . . . .	138
6.16	Ansicht 3-Achs-Magnetometer CLUSTER Typ (schematisch) . . . . .	139
6.17	Wechselwirkung des X- und Z-Sensors mit dem Y-Sensor (schematisch).	140
6.18	Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells an eine simulierte Spike-Sphere-Messung eines Dreiachsensors . . . . .	142
6.19	Restfelder nach Anpassung eines linearen Modells an eine Spike-Sphere- Messung eines Dreiachsmagnetometers des CLUSTER-Typs in seinem größten Messbereich . . . . .	143
A.1	Schematischer Schaltplan „Magnetsrode“ . . . . .	148
B.1	Schematischer Aufbau einer Einzelspule . . . . .	153

# Literaturverzeichnis

- [Acuña et al. 1978] Acuña M.H., Searce C.S., Seek J.B., Scheifle J.: The MAGSAT Vector Magnetometer – A precision Fluxgate Magnetometer for the Measurement of the Geomagnetic Field; NASA Technical Memorandum 79656, 1978.
- [Acuña 1981] Acuña M.H.: MAGSAT – Vector Magnetometer Absolute Sensor Alignment Determination; NASA Technical Memorandum 79648, 1981.
- [Afanasjew 1994] Afanasjew J. W.: Ferrosonden-Geräte; Übersetzung aus dem Russischen; Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1994.
- [Aschenbrenner/Goubau 1936] Aschenbrenner H., Goubau G.: Eine Anordnung zur Registrierung rascher magnetischer Störungen; Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie, Band 47, Heft 6, 1936.
- [Blakely 1996] Blakely R.J.: Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications. Cambridge University Press, 1996.
- [Brauer 1997] Brauer P.: The Ringcore Fluxgate Sensor. Department of Automation, The Technical University of Denmark, June 1997
- [Böhm et al. 1985] Böhm W., Gose G., Kahmann J.: Methoden der numerischen Mathematik. Wiesbaden: Vieweg, 1985.
- [Bronstein, Semendjajew 1979] Bronstein, Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik. Neubearbeitung; BSB B. G Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, und Verlag Nauka, Moskau, 1979.
- [Chen 1977] Chen C.W.: Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials. Dover Publications, Inc. New York, 1977,1986.
- [Fließbach 1997] Fließbach T.: Elektrodynamik, Lehrbuch zur Theoretischen Physik II. 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1997.
- [Greiner 1991] Greiner W.: Klassische Elektrodynamik. 5., Überarb. und erw. Aufl. – Thun; Frankfurt am Main:Deutsch,1991.

- [Henke 1995] Henke T.: Development of precise algorithms for the determination of the time delays of the Cluster spacecraft magnetometers. Diploma Thesis. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1995.
- [Hertz/Lauxen 1993] Hertz P., Lauxen R.: Ermittlung der Richtung magnetischer Felder bei Kalibriermessungen in der Magnetfeld-Simulationsanlage; Bericht B-TR 0835 / 33, IABG, 1993.
- [Huber 1973] Huber P.J.: Robust Regression – Asymptotics, Conjectures and Monte Carlo. *Anal. of Statistics* 1 (1973), pp. 799-821.
- [Joos/Richter 1978] Joos / Richter: Höhere Mathematik für den Praktiker. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 1978.
- [Kammel 1990] Kammel T.: Homogenität und Temperaturverhalten von Ringkernmagnetometerspulen. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1990.
- [Kampke 1996] Kampke A.: Modellierung und Inversion von Daten der induzierten Polarisation für zweidimensionale Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1996.
- [Kertz et al. 1968] Kertz W., Lauche H., Maier A.: Lage und Einrichtung des Magnetischen Laboratoriums des Institutes. GAMMA 1, Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1968.
- [Kertz 1969] Kertz W.: Einführung in die Geophysik I u. II. 1. Aufl.; Mannheim: Bibliographisches Institut, 1969
- [Kertz 1983] Kertz W.: Potentialtheorie in der Geophysik. Zweite verbesserte Auflage. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1983.
- [Korth 1998] Korth H.: Untersuchung der physikalischen Eigenschaften eines Vektormagnetometers mit Netzbaukern. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1998.
- [Kowalsky 1979] Kowalsky H.J.: Lineare Algebra. 9. Überarb. u. erw. Aufl. -Berlin, New York: de Gruyter, 1979.
- [Kügler 1992] Kügler H.: Untersuchungen zur Querfeldbeeinflussung von Fluxgate-Magnetometern anhand der Kalibrierung des TEMAG-Experimentes. Diplomarbeit; Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1992.
- [Kügler 1992-1996] Kügler H.: Results of the xx-Calibration. CL-IGM-TR-0092 (EM), CL-IGM-TR-0174 (F2), CL-IGM-TR-0234 (F3), CL-IGM-TR-0286 (F4), CL-IGM-TR-0341 (F5), CL-IGM-TR-0441 (F1); Institut für



- Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1992–1996.
- [Kügler et al. 1994] Kügler H., Rahm M., Richter I.: Description of the Calibration Data Recording System. CL-IGM-TN-0008, Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1994.
- [Kügler 1994] Kügler H.: Methods of Analysis for Magnetometer Calibration. CL-IGM-TN-0014; Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1994.
- [Kügler 1995] Kügler H.: Analysis of the TSS-1 Temag RE-Calibration. TS-IGM-TR-0002; Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1995.
- [Kügler 1997] Kügler H.: Analysis of the EQUATOR-S Calibration. EQ-IGM-TR-0002; Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1997.
- [Kuhnke et al. 1998] Kuhnke F., Menvielle F., Musmann G., Karczewski J.F., Kügler H., Cavoit C., Schibler P.: The OPTIMISM/MAG Mars-96 experiment: magnetic measurements onboard landers and related magnetic cleanliness program. Planet. Space Sci. Vol. 46, No. 6/7, PP. 749-767, 1998.
- [Kupke 1984] Kupke W.: Verkleinerung der Nichtlinearität und des Temperaturkoeffizienten eines Fluxgatemagnetometers mit Ringkernsensor. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1984.
- [Lautz 1969] Lautz G.: Elektromagnetische Felder. B.G. Teubner Stuttgart, 1969.
- [Lühr 1980] Lühr H.: Das Impulsintegrationsverfahren. Dissertation. Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1980.
- [Lühr 1984] Lühr H.: MAGNETSRODE; Eine Einrichtung für magnetische Kalibrierungen und Testmessungen. GAMMA 42, Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1984.
- [Ness 1970] Ness N.F.: Magnetometers for Space Research; Space Science Reviews **11**(1970) 459–554.
- [Nolting 1997] Nolting W.: Grundkurs Theoretische Physik 3 Elektrodynamik. 5., verbesserte Auflage, Vieweg 1997.
- [Mende/Simon 1983] Mende D., Simon G.: Physik, Gleichungen und Tabellen. 8., Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1983.
- [Musmann-Maeter 1989] Musmann-Maeter J.: Auf- und Entmagnetisierung weichmagnetischer Satellitenbaugruppen. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1989.

- [Olsen 1966] Olsen E.: applied magnetism; a study in quantities. Philips Technical Library, 1966.
- [Press et al. 1994] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterding W.T., Flannery B.P.: Numerical Recipes in C. Cambridge, 2nd Edition 1994.
- [Primdahl 1979] Primdahl F.: The fluxgate magnetometer. J.Phys.E, Scient.Inst.12,241-353. 1979.
- [Rahm 1994] Rahm M.: Report on the TSS-1 Temag RE-Calibration. TS-IGM-TR-0001; Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig.
- [Rahm 1997a] Rahm M.: Report on the F1 Re-Calibration; PH-IGM-TR-0003 1/1, Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1997.
- [Rahm 1997b] Rahm M.: Report on the EQUATOR-S Calibration. EQ-IGM-TR-0001; Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1997.
- [Rahm/Richter 1992-1996] Rahm M., Richter I.: Report on the xx-Calibration. CL-IGM-TR-0022 (EM), CL-IGM-TR-0173 (F2), CL-IGM-TR-0233 (F3), CL-IGM-TR-0285 (F4), CL-IGM-TR-0340 (F5), CL-IGM-TR-0440 (F1); Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1992-1996.
- [Rahm/Richter 1994] Rahm M., Richter I.: Magnetsrode Temperatur-Meßsystem; MR-IGM-TN-0003, Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1994.
- [Rahm/Richter 1995] Rahm M., Richter I.: Mrode Software Manual & Configuration of attached hardware; MR-IGM-TN-0004, Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig, 1995.
- [Rimrott 1989] Rimrott F.P.J.: Introductory Attitude Dynamics. Springer-Verlag New York, 1989.
- [Rodemann 1972] Rodemann H.: Einfluß von Dejustierungen eines Braunbek-Spulen-Systems auf die Feldhomogenität. Diplomarbeit; Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig, 1972.
- [Rother 1997] Rother M.K.A.: Untersuchungen zur rauschfreien Datenreduktion bei extraterrestrischen Magnetfeldern. Dissertation, Naturwissenschaftliche Fakultät der Technischen Universität Braunschweig, 1997.
- [Schulz 1991] Schultz W.: Dielektrische und magnetische Eigenschaften von Werkstoffen. Als Vorlesungsmanuskript vervielfältigt Technische Universität Braunschweig, 1991.

- [Scott 1966] Scott W.T.: The Physics of Electricity and Magnetism. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1966.
- [Tarantola 1987] Tarantola A.: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier, 1987.
- [Tietze/Schenk 1989] Tietze U., Schenk C.: Halbleiterschaltungstechnik; Neunte, neu bearbeitete und erweiterte Auflage; Springer-Verlag, 1989.
- [Überhuber 1995] Überhuber C.: Computer Numerik1 und 2. 1. Aufl; Berlin Heidelberg:Springer,1995.
- [Walter 1986] Walter: Gewöhnliche Differentialgleichungen, Eine Einführung. 3. korrigierte Auflage, Springer Verlag, 1986.
- [Wertz ] Editor Wertz J.R.: Spacecraft Attitude Determination and Control. Astrophysics and Space Science Library, D. Reidel Publishing Company.

## Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Glaßmeier dafür, dass er mir die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Dissertation am Institut für Geophysik und Meteorologie in Braunschweig einräumte.

Ein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Peter Weidelt, der sich auch nach meinem Verlassen des Institutes bereit erklärte, diese Dissertation zu unterstützen.

Großer Dank gehört auch meiner Familie, die ihren Papa so viele Abende und Wochenenden entbehren musste. Nicht unerwähnt bleiben darf an dieser Stelle Herr Dr. Musmann, der mich zu meiner Zeit am Institut immer unterstützt hat. Den Herren Matthias Rahm und Dr. Ingo Richter danke ich für die zielführenden Diskussionen sowie ihrer Bereitschaft auf viele meiner Sonderwünsche einzugehen.

Herrn Dr. Falko Kuhnke danke ich für die Bereitschaft mir Einzelsensoren und Elektronik für Messungen zu Verfügung zu stellen.

## Curriculum vitae

Name:	Kügler, Holger
Geburtsdatum:	24.08.1964
Geburtsort:	Bevensen, Landkreis Ülzen, Deutschland
Staatsangehörigkeit:	deutsch
Familienstand:	verheiratet, eine Tochter (13 Jahre), ein Sohn (4 Jahre)
1971– 1975	Grund- und Hauptschule Leiferde
1975– 1978	Otto-Hahn-Gymnasium, Gifhorn
1978– 1984	Humboldt-Gymnasium, Gifhorn
4.1984	Abitur
10.1984–1.1992	Studium der Physik an der Technischen Universität Braunschweig
1.1992	Abschluss als Diplom-Physiker
2.1992–9.1998	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig Kalibrierung der Magnetfeldexperimente der wissenschaftlichen Satelliten Tether, Mars96, Cluster1, Cassini, EquatorS Analyse der magnetischen Reinheitsmessungen von Cluster1, Mars96, Huygens/Cassini
10.1998–heute	wissenschaftlicher Mitarbeiter der IABG

### Veröffentlichungen:

F. Kuhnke, M. Menvielle, G. Musmann, J.F. Karczewski, H Kügler, C. Caviot, P. Schibler: The OPTIMISM/MAG Mars-96 experiment: magnetic measurements on-board landers and related magnetic cleanliness program, in Planet. Space Sci., Vol. 46, No. 6/7, pp. 749-767, 1998, Elsevier Science Ltd (1998)